

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Installations Energétiques et Turbomachines

Par :

DJEBBAR Faouzi

SIAD Syfax

Thème

**Optimisation de l'efficacité énergétique dans les systèmes de production de vapeur par la
récupération de condensat et l'intégration d'un économiseur dans le circuit gaz
d'échappement**

CEVITAL Bejaia

Soutenu le 03/07/2024 devant le jury composé de :

Mr. M'HAMDI Mohammed Salah

Président

Mr. ADNANI Massinissa

Rapporteur

Mr. MENDIL Fatsah

Examineur

Année Universitaire 2023-2024



Déclaration sur l'honneur
Engagement pour respecter les règles d'authenticité
scientifique dans l'élaboration d'un travail de recherche

Arrêté ministériel n° 1082 du 27 Décembre 2020
fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat

Je soussigné,

Nom : SIAD
Prénom : S y f a x
Matricule : 191933007695
Spécialité et/ou Option : Installations énergétiques et turbomachines
Département : Génie mécanique
Faculté : Technologie
Année universitaire : 2023/2024

Et chargé de préparer un mémoire de : Master

Intitulé: Optimisation de l'efficacité énergétique dans les systèmes de production de vapeur par la récupération de condensat et l'intégration d'un économiseur dans le circuit gaz d'échappement.

déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques, et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Bejaia le 30/06/2024

Signature de l'intéressé



Déclaration sur l'honneur
Engagement pour respecter les règles d'authenticité
scientifique dans l'élaboration d'un travail de recherche

Arrêté ministériel n° 1082 du 27 Décembre 2020
fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat

Je soussigné,

Nom : DJEBBAR
Prénom : Faouzi
Matricule : 161633010053
Spécialité et/ou Option : Installations énergétiques et turbomachines
Département : Génie mécanique
Faculté : Technologie
Année universitaire : 2023/2024

Et chargé de préparer un mémoire de : Master

Intitulé: Optimisation de l'efficacité énergétique dans les systèmes de production de vapeur par la récupération de condensat et l'intégration d'un économiseur dans le circuit gaz d'échappement.

déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques, et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Bejaia le 30/06/2024

Signature de l'intéressé

Remerciements

Nous remercions tout d'abord ALLAH de nous avoir guidé à faire les bons choix tout au long de notre cursus.

Nous remercions les chers parents pour leur soutien sans faille tout au long de la durée de ce travail.

Nous remercions sincèrement l'encadrant Mr. ADNANI, pour sa disponibilité, ses conseils précieux et son soutien constant tout au long de ce projet.

Nous sommes également reconnaissant envers la société CEVITAL et leur collègue Mr. BOUTAGHANE pour avoir offert l'opportunité de réaliser ce projet au sein de leur structure.

Nous tenons aussi à remercier tous les membres du jury qui nous feront l'honneur de juger notre travail.

Nous remercions enfin toute personne ayant aidé de près ou de loin pour la réalisation de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

Au meilleur des pères ;

À ma très chère maman ;

Qu'ils trouvent en moi la source de leur fierté à qui je dois tout ;

*À mon frère et sœur que j'aime infiniment à qui je souhaite un avenir radieux plein de
réussite*

À mon neveu amine que j'adore beaucoup ;

*À tous mes amis (es) plus particulièrement mes collègues de master génie mécanique
promotion 2024, mes profs.*

FAOUZI

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

À mon père qui m'a donnée tout ce qu'il avait de précieux ;

À ma mère qui toujours ma encouragé et soutenu ;

À mes chères frères Youba, Arselane, Amayas et Rinas ;

À mon chère binôme Faouzi qui a fait un grand travail ;

À tous mes amis Mourad, Anis, Fares et Zoubir ;

À mon amie Basma ;

À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ce travail ;

À tous mes collègues de master génie mécanique promotion 2024 .

SYFAX

Sommaire

| | |
|------------------------------------|-------------|
| Remerciements | i |
| Dédicaces | ii |
| Sommaire | iv |
| Liste des figures | viii |
| Liste des tableaux | ix |
| NOMENCLATURE | xii |
| Introduction Générale | 1 |

Chapitre I : L'etat de l'art

| | |
|--|----|
| I.1. Introduction | 2 |
| I.2. Processus de production et de distrubition de vapeur dans l'industrie | 2 |
| I.3. Définition de système de production de vapeur | 4 |
| I.3.1. Classification et caractérisation des différents types de chaudières..... | 4 |
| I.3.2. Comparaison des performances des deux chaudières de vapeur | 5 |
| I.3.3. Principaux éléments d'une chaudière | 7 |
| I.4. Récupération des pertes de chaleur de la chaudière | 10 |
| I.4.1. Gaz de carneau | 10 |
| I.4.2. Les économiseurs à condensation | 11 |
| I.4.3. Récupération de chaleur générée par la purge | 11 |
| I.5. Le condenseur | 11 |
| I.6. Le condensat et son processus de récupération | 11 |
| I.7. Le rôle des purgeurs à vapeur | 12 |
| I.8. Les Type de purgeur | 12 |
| I.8.1. Purgeur thermostatique | 12 |
| I.8.2. Purgeur mécanique | 14 |
| I.8.3. Purgeur thermodynamique | 15 |
| I.9. Synthèse bibliographie | 16 |
| I.10. Conclusion..... | 17 |
| Chapitre II :Vu globale de la centrale de production et de distribution de vapeur | |
| II.1. Introduction | 18 |

| | |
|--|----|
| II.2. L'objectif des composants de cette centrale de production et de distribution de vapeur | 19 |
| II.2.1. Chaudière | 19 |
| II.2.2. Pompe..... | 19 |
| II.2.3. Collecteur à vapeur 12 bars | 19 |
| II.2.4. Régulation et distribution de vapeur | 19 |
| II.2.5. Utilisation de la vapeur | 20 |
| II.3. Gestion de condensat et de l'eau | 22 |
| II.3.1. Bache (Réservoir d'eau) | 22 |
| II.3.2. Gouttière pour condensat | 22 |
| II.4. Sécurité et fiabilité | 22 |
| II.5. Equipement de régulation | 22 |
| II.6. Description de fonctionnement de chaque composant de cette centrale à vapeur | 23 |
| II.6.1. Les pompes centrifuges | 23 |
| II.6.2. Bache alimentaire | 23 |
| II.6.3. Collecteur de vapeur..... | 24 |
| II.6.4. Détendeur de pression | 25 |
| II.6.5. Chaudière | 26 |
| II.7. Echangeur de chaleur | 27 |
| II.7.1. Echangeur tubulaire..... | 27 |
| II.8. L'objectif de notre étude | 30 |
| Chapitre III :Bilans énergétiques et simulations | |
| III. 1. Introduction | 35 |
| III.2. Premier principe de thermodynamique | 35 |
| III.3. Bilan énergétique de détendeur | 35 |
| III.3.1. Premier principe de thermodynamique | 35 |
| III.3.2. Titre en vapeur | 36 |
| III.4. Bilan énergétique de bache alimentaire..... | 36 |
| III.4.1. Premier principe de thermodynamique | 36 |
| III.5. Bilan énergétique d'un économiseur | 36 |
| III.5.1. La quantité de chaleur | 37 |
| III.5.2. La température de l'eau à la sortie de l'économiseur..... | 37 |
| III.6. Débit combustible | 37 |
| III.6.1. Débit combustible consommé schéma 2 | 37 |

| | |
|--|-----------|
| III.6.2. Débit combustible consommé de schéma sans soutirage de vapeur 12' | 37 |
| III.6.3. Débit combustible consommé avec soutirage de vapeur 12' | 38 |
| III.6.4. Débit combustible consommé réel de schéma 2 | 38 |
| III.7. Interprétations et discussions | 38 |
| III.8. Conclusion..... | 43 |
| Conclusion Générale | 44 |

Références Bibliographiques

ANNEXES

Annexe A : Table thermodynamique de l'eau

Annexe B : Table thermodynamique de vapeur saturé

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure I.1 : Chaudière industriel..... | 2 |
| Figure I.2 : Schéma de production et de distribution de vapeur..... | 3 |
| Figure I.3 : Schéma représentatif de la composition d'une chaudière tube eau..... | 4 |
| Figure I.4 : Schéma représentatif de la composition d'une chaudière tube fumée... .. | 5 |
| Figure I.5 : Bruleur..... | 8 |
| Figure I.6 : Les ballons supérieurs et inférieurs | 9 |
| Figure I.7 : Economiseur..... | 9 |
| Figure I.8 : Principe de fonctionnement d'un économiseur... .. | 9 |
| Figure I.9 : Schéma de principe de fonctionnement d'un surchauffeur... .. | 10 |
| Figure I.10 : Installation adéquate des purgeurs sur une long tuyauterie..... | 12 |
| Figure I.11 : Purgeur thermostatique à dilatation de liquide et ca courbe de réponse..... | 12 |
| Figure I.12 : Purgeur thermostatique à tension de vapeur et ca courbe de réponse... .. | 13 |
| Figure I.13 : Purgeur thermostatique bimétallique..... | 13 |
| Figure I.14 : Purgeur mécanique à flotteur fermée..... | 14 |
| Figure I.15 : Purgeur à flotteur inverse ouvert... .. | 14 |
| Figure I.16 : Purgeur thermodynamique à disque... .. | 15 |
| Figure II.1 : Schéma 1 de la centrale de production et de distribution de vapeur actuelle ... | 18 |
| Figure II.2 : Les trois générateurs de vapeur CEVITAL | 19 |

| | |
|--|----|
| Figure II.3 : Echangeur monotube CEVITAL... | 20 |
| Figure II.4 : Echangeur a plaque tubulaire CEVITAL..... | 20 |
| Figure II.5 : Echangeur coaxiaux (double tube) CEVITAL..... | 21 |
| Figure II.6 : Echangeurs tubes calandre (pectine) CEVITAL..... | 21 |
| Figure II.7: Les soupapes de sécurité CEVITAL..... | 22 |
| Figure II.8 : Schéma d'une pompe centrifuge | 23 |
| Figure II.9 : Schéma représentatif de la composition d'une bache alimentaire ... | 24 |
| Figure II.10 : Collecteur à vapeur ... | 25 |
| Figure II.11 : Detendeur de pression a vapeur ... | 25 |
| Figure II.12 : Chaudière à tube fumée Babcock Wanson | 27 |
| Figure II.13 : Echangeur thermique monotube ... | 27 |
| Figure II.14 : Echangeur coaxiaux (double tube) | 28 |
| Figure II.15 : Schéma typique d'un échangeur tube calandre | 29 |
| Figure II.16 : Composition d'un échangeur à plaque | 30 |
| Figure II.17 : Schéma 2 de la centrale de production et de distribution de vapeur après l'amélioration | 31 |
| Figure III.1 : Diagramme [T,S] des paramètres thermodynamiques obtenus du tableau III.1 ... | 40 |
| Figure III.2 : Diagramme [T,S] des paramètres thermodynamiques obtenus du tableau III.2 ... | 42 |

Liste des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau I.1 : Comparison des performances des chaudières..... | 6 |
| Tableau III.1 : Table des paramètres thermodynamique selon les points de schéma 1... .. | 39 |
| Tableau III.2 : Table des paramètres thermodynamique selon les points de schéma 2... .. | 41 |

NOMENCLATURE

| Symboles | Définition | Unité (SI) |
|-----------|---|------------|
| U | : Energie interne | J |
| Q | : Quantité de chaleur | J |
| W | : Travail massique | J |
| C_p | : Chaleur massique à pression constante | J/kg. K |
| C_v | : Chaleur massique à volume constante | J/kg. K |
| p | : Pression | Bar |
| T | : Température | K |
| Q_v | : Débit massique | m^3/s |
| h | : Enthalpie | kJ/kg |
| V | : Volume | m^3 |
| \dot{m} | : Débit massique | Kg/s |
| X | : Titre en vapeur | / |
| S | : Entropie | J/Kg. K |

Symboles grecs

| | | |
|-----------------------|----------------------------------|-------|
| $\alpha(\text{CO}_2)$ | : La teneur de CO2 dans la fumée | % |
| η | : Le rendement | % |
| | | kJ/kg |

Abréviations

| | |
|-----|---------------------------------|
| PCI | : Pouvoir calorifique inférieur |
|-----|---------------------------------|

Introduction Générale

Introduction générale

Le gaz naturel est la source d'énergie fossile à la croissance la plus rapide depuis les années 70, représentant un quart de la consommation énergétique mondiale. En raison de ses avantages économiques et environnementaux, il est considéré comme le combustible fossile dominant du siècle, succédant au pétrole du siècle précédent et au charbon d'il y a deux siècles.

La vapeur, un fluide caloporteur abondant, facilement transportable et non toxique, nécessite l'utilisation d'un combustible et d'un générateur de vapeur (chaudière) pour sa production.

L'eau est utilisée comme agent de refroidissement dans les échangeurs à eau, mais elle est surtout employée pour générer de la vapeur, qui à son tour fournit l'énergie thermique nécessaire au réchauffage, pasteurisation des produits, ainsi que l'énergie mécanique pour faire fonctionner des équipements tels que turbines.

L'optimisation de l'efficacité énergétique dans les systèmes de production de vapeur est confrontée à plusieurs défis majeurs. Les pertes de chaleur importantes par les gaz d'échappement non exploités et le condensat non récupéré contribuent à une inefficacité tant sur le plan énergétique et économique. Réduire la consommation élevée de combustibles fossiles dans la production de vapeur est essentiel pour maximiser l'utilisation des ressources thermiques disponibles. De plus, il est crucial de réduire les coûts opérationnels et environnementaux associés à l'énergie et à la maintenance des équipements en minimisant les émissions de gaz à effet de serre grâce à une meilleure utilisation de la chaleur résiduelle.

L'intégration d'un économiseur et la mise en place efficace de la récupération de condensat nécessitent une conception précise et une maintenance rigoureuse pour garantir des performances optimales. En adoptant une approche proactive, les industries cherchent à améliorer leur efficacité énergétique, à diminuer leur impact environnemental et à optimiser leurs coûts opérationnels à long terme, favorisant ainsi des pratiques industrielles durables et responsables.

Dans ce travail, nous nous sommes concentrés sur l'optimisation de cycle thermodynamique de production de vapeur de CEVITAL. Pour mener à bien notre étude, nous avons structuré ce manuscrit en trois chapitres. Le premier chapitre présente une introduction générale aux états de l'art de la recherche qui se fait dans cette technique d'optimisation.

Le second chapitre est à propos du vu global de la centrale de production de vapeur. Le troisième chapitre aborde le bilan énergétique et la simulation de cycle de production de vapeur existant et pour le cycle proposé, en utilisant les équations thermodynamiques et aussi un logiciel « EES ». Enfin, nous concluons notre travail par une synthèse de nos résultats.

Chapitre I

Etat de l'art

I.1. Introduction

L'optimisation de l'efficacité énergétique est devenue un impératif majeur dans un monde confronté à des défis croissants en matière de consommation d'énergie et de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Dans ce contexte, les systèmes de production de vapeur jouent un rôle crucial dans de nombreuses industries, allant de la production d'électricité à la transformation des produits chimiques, en passant par les procédés industriels. Cependant, ces systèmes traditionnels sont souvent inefficaces, perdant une quantité significative de chaleur à travers le condensat rejeté.

C'est dans ce cadre que l'intégration d'un économiseur dans le circuit gaz d'échappement et la récupération de condensat émergent comme des solutions prometteuses pour améliorer l'efficacité énergétique des systèmes de production de vapeur. En récupérant la chaleur perdue sous forme de condensat et en l'utilisant pour préchauffer l'eau d'alimentation, et en intégrant un économiseur pour récupérer la chaleur des gaz d'échappement, il est possible d'optimiser considérablement la performance énergétique de ces systèmes.



Figure I.1: Chaudière industriel [1]

I.2. Processus de production et de distribution de vapeur dans l'industrie

L'utilisation de la vapeur comme source de chaleur a une histoire longue et diversifiée, appliquée d'abord à la maison. Le chauffage dès l'époque romaine et est courant aujourd'hui dans les grands environnements industriels.

La taille exacte et l'utilisation d'un système moderne varient considérablement, il existe un modèle général suivi par les systèmes à vapeur, comme le montre la figure I.2.

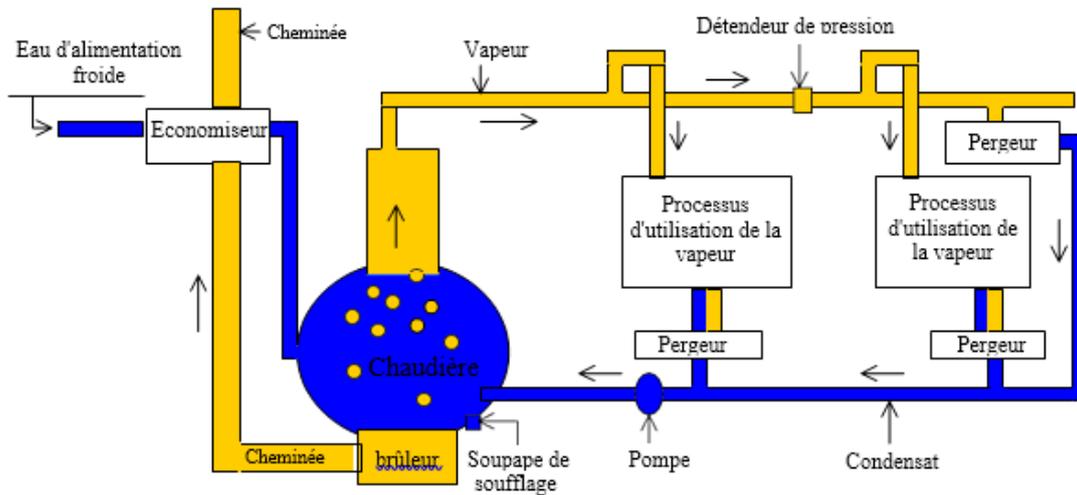


Figure I.2: Schéma d'un système de production et de distribution de vapeur [1]

L'eau froide traitée est envoyée vers la chaudière pour être chauffée et transformée en vapeur. Un traitement chimique est essentiel pour éliminer les impuretés de cette eau, évitant ainsi leur accumulation sur les parois de la chaudière. Même après ce traitement, des impuretés peuvent persister, pouvant s'accumuler dans l'eau de la chaudière. Ainsi, l'eau est régulièrement évacuée du fond de la chaudière dans un processus appelé purge. La vapeur produite circule à travers les tuyaux du système de distribution pour atteindre les procédés nécessitant de la chaleur. Parfois, cette vapeur passe par une vanne de réduction de pression si une pression plus basse est requise. Au fur et à mesure de son utilisation pour le chauffage des procédés, la vapeur se refroidit et se condense en partie, ce condensat étant éliminé par un purgeur de vapeur. Ce dernier permet le passage du condensat tout en bloquant la vapeur. Le condensat peut être réintroduit dans la chaudière, ce qui permet de récupérer de la chaleur et de réduire la consommation d'eau fraîchement traitée.

Dans l'industrie, la vapeur est utilisée pour diverses applications, notamment le chauffage, le séchage ou la concentration, le vapocraquage et la distillation. Le séchage ou la concentration implique l'utilisation de la vapeur pour évaporer l'eau et concentrer les solides dans une solution, ou pour sécher un produit solide. Le vapocraquage est utilisé pour produire des combustibles plus légers en chauffant simplement la vapeur et le combustible dans une chambre à haute pression. Enfin, la distillation est employée pour séparer des produits chimiques ou des combustibles spécifiques à partir d'une matière première complexe.[1]

I.3. Définition de système de production de vapeur

Une chaudière ou générateur de vapeur est un équipement servant à la transformation de l'eau liquide en vapeur, selon la température et la pression définie par la destination de cette vapeur, sous l'effet d'apport de chaleur.

L'apport de chaleur est généralement réalisé par la combustion d'un combustible dans le foyer de la chaudière. Il peut être aussi externe (gaz chauds des différents processus).

I.3.1. Classification et caractérisation des différents types de chaudières

On retrouve deux principaux types de chaudières de vapeur (tube d'eau et tube de fumées). La conception de certaines chaudières est le résultat d'un mélange entre les deux principaux types, appelés « chaudières hybrides ».

a. Chaudières à tubes d'eau

Ce sont des chaudières parcourus intérieurement par l'eau et l'émulsion eau vapeur, fournissent un débit de vapeur saturée supérieur à 20 tonnes/heure, en moyenne et haute pression, le combustible utilisé est soit du gaz, du fioul, du charbon, ils possèdent deux réservoirs appelés ballon distributeur (en partie inférieure) et ballon collecteur (ou encore ballon de vaporisation, en partie supérieure), reliés par un faisceau de tubes vaporisateurs, dans cet ensemble circule l'eau qui se transforme en vapeur.[4]

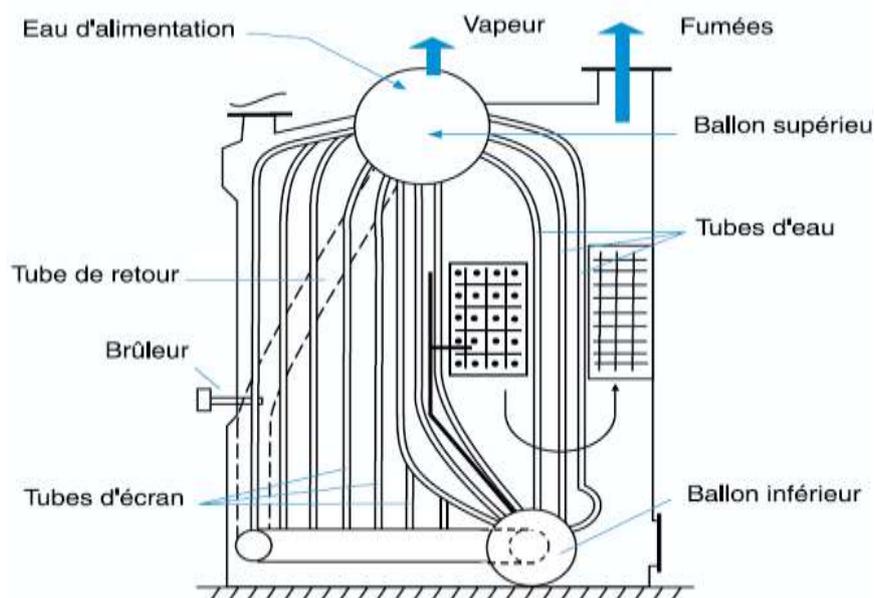


Figure I.3: Schéma représentatif de la composition d'une chaudière tube eau [4]

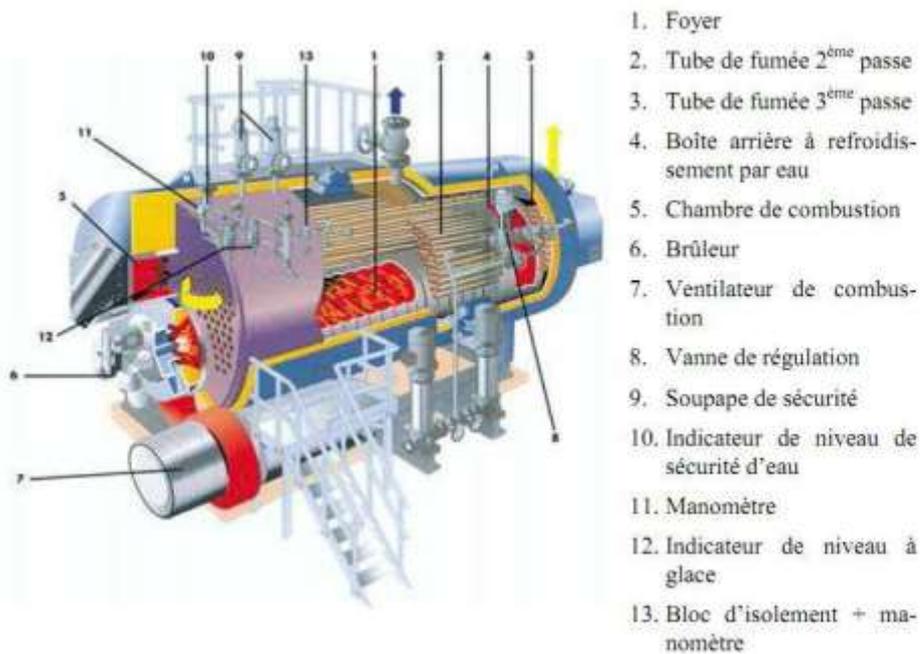


Figure I.4: Schéma représentatif de la composition d'une chaudière à tube de fumées [5]

b. Chaudières à tubes fumée

Ce sont des chaudières de vapeur où les gaz de combustion passent à l'intérieur de tubes submergés dans l'eau, ces chaudières de vapeur sont largement utilisées dans les installations industrielles et commerciales, beaucoup plus dans les locomotives. Une chaudière de vapeur à tubes de fumée moderne peut produire de la vapeur à pression jusqu'à 25 bars (basse et moyenne pressions), et un débit de 1 à 25 tonnes/h. Ces chaudières de vapeur peuvent utiliser du gaz naturel, de l'huile ou du combustible solide [5].

I.3.2. Comparaison des performances des deux chaudières de vapeur

Le choix d'une chaudière de vapeur s'avère crucial et dépend de plusieurs aspects et critères spécifiques à chaque besoin et objectif. Afin de vous éclairer dans votre décision, voici une comparaison des deux principaux types de construction : les chaudières de vapeur à tubes fumées et chaudières à tubes à l'eau.

Tableau I.1: Comparaison des performances des chaudières [6].

| Propriétés | Chaudières de vapeur à tube fumées | Chaudières de vapeur à tubes à l'eau |
|---|--|--|
| Mise en route (à puissance équivalente) | Lente (grand volume d'eau à chauffer) | Rapide |
| Adaptation aux changements de régime | Médiocre (inertie importante) | Bonne |
| Surface de chauffe | Moyenne | Elevée |
| Sécurité | Médiocres | Bonne |
| Encombrement | Faible | Fort |
| Prix | Limité | Elevé |
| Applications usuelles | <ul style="list-style-type: none"> • Moyennement élevée • 1,5 à 25 t/h • 10 à 20 bars | <ul style="list-style-type: none"> • Importante • 4 à 200 t/h • 90 à 100 bars (En Circulation naturelle) et jusqu'à 225 bars (Circulation forcée) |

a. Rôle des chaudières

Une chaudière utilise un combustible pour apporter de l'énergie à un fluide caloporteur (l'eau par exemple). Elle fournit ainsi un fluide aux caractéristiques imposées par l'utilisation prévue, ce qui explique la variété des types de chaudières (à eau chaude, à vapeur saturée, à vapeur surchauffée).[2]

L'objectif principal des chaudières est de produire la vapeur d'eau en absorbant de la chaleur avec le meilleur rendement possible. Elles sont indispensables dans les usines pour assurer de manière fiable le fonctionnement des unités de production. [3]

Elles ont pour rôle :

- D'apporter l'énergie nécessaire (vapeur de réchauffage, entrainement de turbine) .
- D'intervenir dans les procédés (réaction chimique, vapeur de dilution, de stripping) .

I.3.3. Principaux éléments d'une chaudière

D'un point de vue schématique, une chaudière à combustible peut se ramener à :

a. Chambre de combustion

Il s'agit de la zone où se déroule le processus de combustion, avec une variété de combustibles possibles : solides, gazeux ou liquides. Cette zone est revêtue de tubes d'eau qui constituent les surfaces de chauffe exposées au rayonnement de la flamme.

Les brûleurs, placés entre les parois et les tubes déviés, peuvent être positionnés au centre des panneaux (chauffage en façade) ou dans les coins (chauffage tangentiel) pour créer une turbulence significative au cœur de la chambre de combustion.

L'air nécessaire à la combustion, propulsé par un ventilateur, est distribué aux brûleurs par le biais d'un large caisson d'air, garantissant ainsi une distribution uniforme.[7]

b. Brûleurs

Un brûleur est effectivement un élément mécanique crucial dans les systèmes de chauffage, comme les chaudières. Sa fonction principale est de produire de la chaleur en mélangeant un combustible (comme du gaz ou du fioul) avec de l'air (comburant), ce qui déclenche une combustion.

L'efficacité de la combustion dépend fortement de la performance du brûleur. Un bon brûleur assure un mélange optimal du combustible et de l'air, ce qui se traduit par une combustion plus propre et plus complète, réduisant ainsi l'émission de polluants et d'imbrûlés dans les fumées.

En plus de son rôle principal de mélange, le brûleur peut avoir d'autres fonctions, telles que :

- Réguler la puissance de la flamme en fonction des besoins en chauffage.
- Assurer la sécurité du système en surveillant la flamme et en coupant l'alimentation en combustible en cas de problème.
- Favoriser l'allumage et la stabilisation de la flamme.[8]



Figure I.5: Bruleur [8]

c. Faisceau de convection

Dans les entrailles des chaudières, un composant crucial orchestre la transformation de l'eau en vapeur : le faisceau vaporiseur. Ce réseau de tubes verticaux nus, reliés aux ballons inférieur et supérieur, joue un rôle essentiel dans la production de vapeur.

Des chicanes, judicieusement placées au sein de ce faisceau, s'assurent que les fumées empruntent un cheminement optimal, optimisant ainsi l'échange thermique. L'importance du faisceau vaporiseur dans la surface d'échange totale dépend de la pression de fonctionnement. En effet, plus la pression est élevée, plus la chaleur latente de vaporisation de l'eau est faible, et donc moins de surface d'échange est nécessaire.

Au-delà de 80 à 100 bars, les parois de la chambre de combustion suffisent à elles seules à assurer la vaporisation complète de l'eau (chaudières radiantes).

Le faisceau vaporiseur se compose de deux zones distinctes :

- **Le ballon supérieur :** C'est ici que se produit la séparation entre la phase liquide et la phase vapeur. La vapeur saturée s'échappe par le haut du ballon (H) pour alimenter les surchauffeurs.
- **Le ballon inférieur :** Il alimente en eau liquide l'ensemble des tubes. Soumise à l'apport de chaleur, l'eau se vaporise partiellement à l'intérieur de ces tubes avant de retourner vers le ballon supérieur.

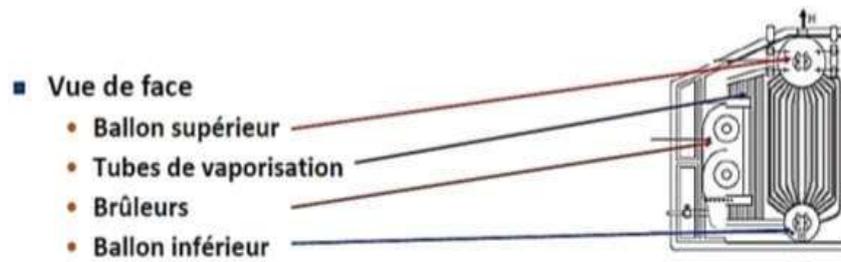


Figure I.6: Les ballons, supérieur et inférieur. [8]

d. Economiseur

L'économiseur est un échangeur de chaleur à multi passages situé dans l'écoulement des gaz d'échappement chauds sortant de la chaudière à vapeur. L'économiseur divisé parfois en différents éléments, est généralement constitué de tubes à ailettes ou de tubes lisses.[9]



Figure I.7: Economiseur [9]

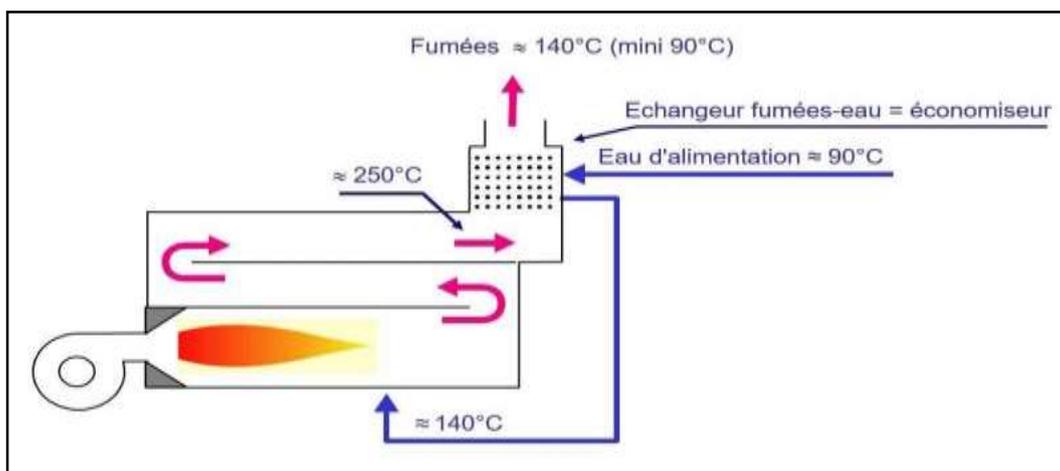


Figure I.8: Principe de fonctionnement d'un économiseur [9]

e. Vaporisateurs

Les vaporisateurs se présentent généralement sous la forme d'écrans soudés à la chaudière, mais peuvent parfois être complétés par des faisceaux de tubes. L'eau circule naturellement dans ces conduits au rythme de sa transformation en vapeur, profitant d'un principe simple : la différence de densité entre l'eau froide et dense qui descend dans les tubes et le mélange plus léger d'eau et de vapeur.

Ce mouvement naturel, appelé thermosiphon, permet une circulation continue de l'eau, optimisant ainsi l'échange thermique et la production de vapeur. Plus la température des fumées est élevée, plus l'ébullition est rapide et efficace.[10]

f. Surchauffeurs

La surchauffeur est constituée d'étages primaires et secondaires. La surchauffeur secondaire est constituée de tronçons verticaux et horizontaux. Le tronçon vertical est situé en face de l'écran tubulaire du four alors que le tronçon horizontal dont l'écoulement de vapeur est parallèle à celui du gaz de carneau est situé en aval de la cavité de passe de retour derrière l'écran tubulaire.[2]

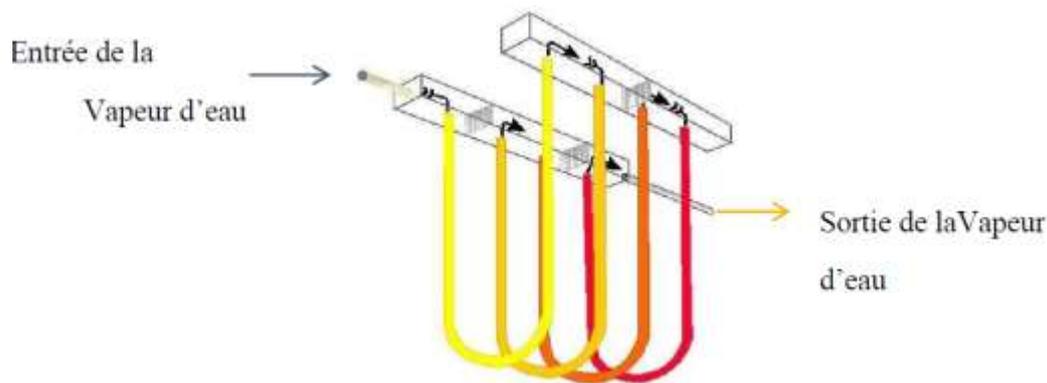


Figure I.9: Schéma de principe de fonctionnement d'une surchauffeur.[2]

I.4. Récupération des pertes de chaleur de la chaudière

I.4.1. Gaz de carneau

La récupération de chaleur dans le générateur de vapeur offre une opportunité importante d'optimisation énergétique. Même avec des brûleurs efficacement réglés, une partie de la chaleur pourrait autrement être perdue par la cheminée. Cette chaleur récupérée peut être utilisée pour préchauffer l'eau d'alimentation de la chaudière ou pour réchauffer l'air comburant. Les économiseurs, bien que bénéfiques, doivent être utilisés avec prudence en raison des risques de corrosion, notamment dans les combustibles contenant du soufre. Chaque chaudière a une

limite de température basse des gaz de carneau à considérer pour une récupération efficace de la chaleur. Les économiseurs sont souvent équipés de dispositifs de contrôle pour maintenir les températures au-dessus d'un seuil minimum, en particulier à faible charge. [11]

I.4.2. Les économiseurs à condensation

Ils permettent d'améliorer l'efficacité de la récupération de la chaleur des gaz de carneau en refroidissant ces gaz à une température sous le point de rosée acide. Ils permettent ainsi de récupérer tant la chaleur sensible provenant des gaz de carneau que la chaleur latente de l'humidité qui condense. Il peut y avoir de l'humidité dans le combustible, mais la plus grande partie se forme par combustion de l'élément d'hydrogène du combustible. Comme la condensation est inévitable, le système d'échange de chaleur doit être conçu avec des matériaux qui ne se corrodent pas. Dans les économiseurs à contact direct, l'eau est vaporisée directement dans les gaz de carneau et l'eau chaude qui est ainsi générée est recueillie et utilisée après traitement afin de neutraliser son potentiel de corrosion. Grâce aux économiseurs à condensation, les rendements globaux des chaudières peuvent être supérieurs à 90 %. [11]

I.4.3. Récupération de chaleur générée par la purge

Nous avons discuté précédemment de méthodes pour réduire la purge et la perte de chaleur. Les échangeurs thermiques peuvent récupérer la chaleur sensible provenant de la purge et la diriger vers le réseau d'égouts pour chauffer l'eau d'appoint de la chaudière et pour d'autres utilisations similaires. [11]

I.5. Le condenseur

La vapeur saturée qui s'échappe des turbines à vapeur est condensée dans un échangeur à faisceau tubulaire refroidi par une circulation continue d'eau de mer. Un condenseur est requis pour chaque turbine à vapeur et l'eau ayant circulé dans le condenseur est rejetée en totalité dans la mer. Par contre le condensat, qui circule en circuit fermé, sera retourné aux chaudières de récupération afin d'y être de nouveau évaporé, pressurisé et surchauffé aux conditions requises par la turbine à vapeur. [12]

I.6. Le condensat et son processus de récupération

Dans une chaudière à vapeur, le condensat se forme lorsque la vapeur d'eau refroidit Après avoir libéré sa chaleur dans un système de chauffage ou un processus industriel. Ce condensat est récupéré à l'aide des purgeurs et réintroduit dans le système de la chaudière, ce qui permet non seulement d'économiser de l'eau et de l'énergie, mais aussi d'optimiser le fonctionnement global du système.[13]

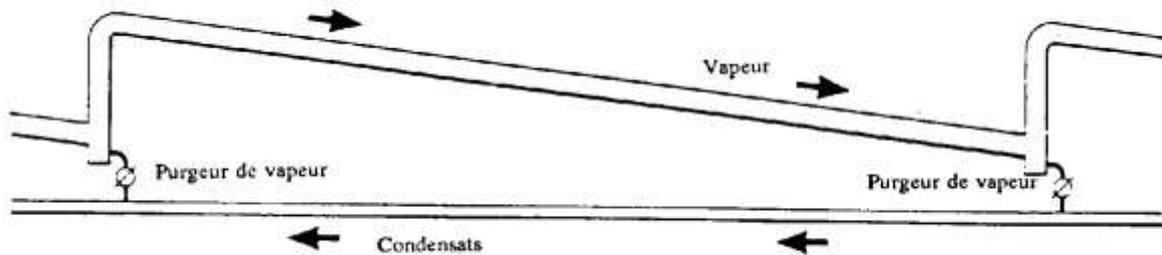


Figure I.10: Installation adéquate des purgeurs sur une longue tuyauterie

I.7. Le rôle des purgeurs à vapeur

Le purgeur de condensat joue un rôle essentiel en évacuant rapidement les liquides de condensation pour garantir un fonctionnement optimal des systèmes de vapeur industrielle, tout en prévenant les pertes de vapeur et en maintenant l'efficacité énergétique.[13]

I.8. Les Types de purgeur

I.8.1. Purgeur thermostatique

a. Purgeur thermostatique à dilatation de liquide

Ce mécanisme utilise un liquide à coefficient de dilatation élevé pour contrôler le mouvement d'ouverture et de fermeture d'un clapet en fonction des changements de température, permettant ainsi de maintenir la valve ouverte à une température précise.[13]

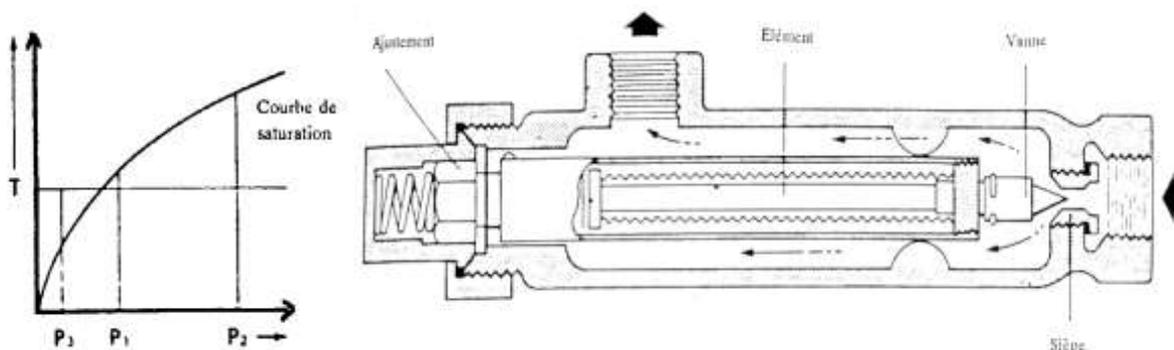


Figure I.11: Purgeur thermostatique à dilatation de liquide et sa courbe de repense [13]

b. Le purgeur thermostatique à tension de vapeur

Le purgeur thermostatique à tension de vapeur fonctionne en utilisant un fluide dont le point d'ébullition est inférieur à celui de l'eau. Quand ce fluide à base d'alcool s'évapore sous pression, le soufflet se dilate, ce qui ferme le clapet. À mesure que les condensats se refroidissent et que le fluide redevient liquide, le soufflet se contracte, ouvrant ainsi le clapet.

Ce mécanisme permet un ajustement automatique en réponse aux variations de pression de vapeur, en se basant sur la différence entre la pression de vapeur et celle exercée sur le soufflet. [13]

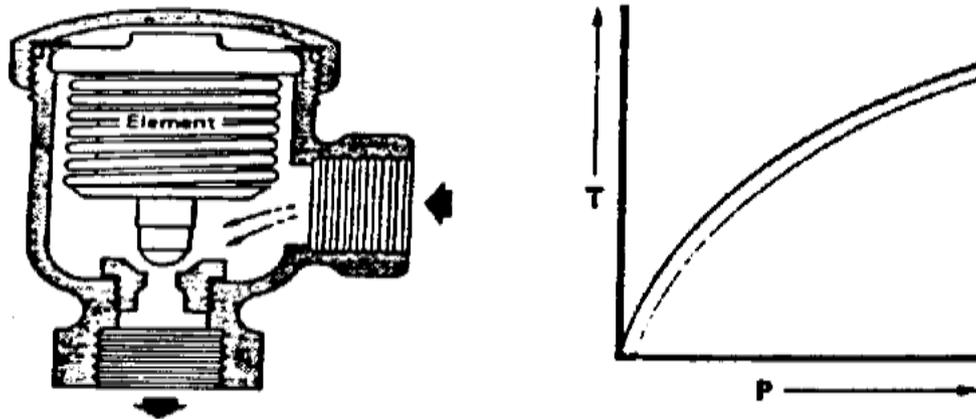


Figure I.12: Purgeur thermostatique à tension de vapeur et sa courbe de repense [13]

c. Le purgeur thermostatique bimétallique

Le purgeur thermostatique bimétallique est constitué de lames fabriquées à partir de métaux différents, qui se déforment en fonction de la température. Quand la vapeur les chauffe, ces lames se courbent, fermant le clapet. En refroidissant, les condensats influent sur les lames qui se redressent, ouvrant ainsi le clapet. Pour s'ajuster à des variations de pression, plusieurs lames bimétalliques sont utilisées afin de suivre la courbe de saturation de la vapeur. [13]

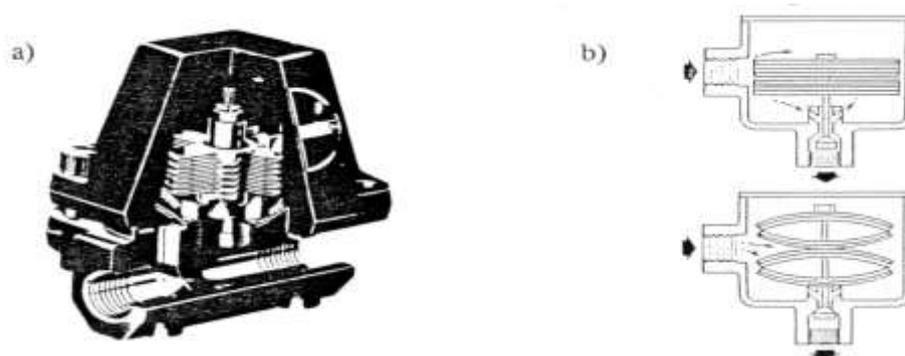


Figure I.13: Purgeur thermostatique bimétallique [13]

I.8.2. Purgeur mécanique

a. Les purgeurs mécaniques à flotteur fermé

Les purgeurs mécaniques à flotteur fermé utilisent un flotteur sphérique étanche pour réguler le clapet en fonction du niveau d'eau dans le purgeur. Le débit d'évacuation est automatiquement modulé selon le débit des condensats entrants. L'air est évacué par le biais d'un évent thermostatique intégré dans le corps du purgeur. [13]

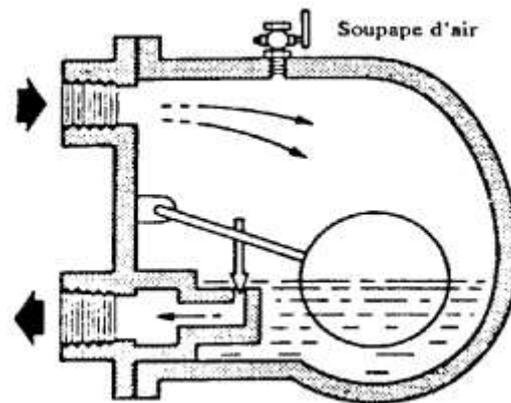


Figure I.14: Purgeur mécanique à flotteur fermé [13]

b. Purgeur mécanique à flotteur inversé ouvert

Le fonctionnement du purgeur mécanique à flotteur inversé ouvert repose sur l'utilisation d'un flotteur inversé pour contrôler l'ouverture du clapet en fonction du niveau des condensats présents dans le flotteur. Il opère de manière intermittente, conformément à un cycle préétabli. [13]

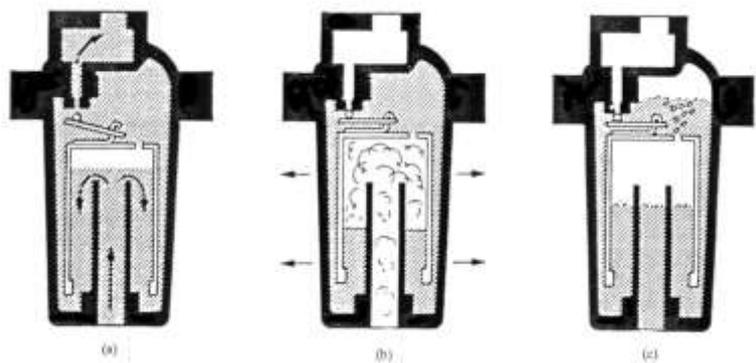


Figure I.15: Purgeur à flotteur inverse ouvert [13]

I.8.3. Purgeur thermodynamique

a. Purgeur thermodynamique à disque

Le fonctionnement du purgeur thermodynamique à disque consiste à contrôler le débit des condensats grâce au mouvement du disque lors de leur passage. La position du disque, ouvert ou fermé, est déterminée par les variations de pression de chaque côté. [13]

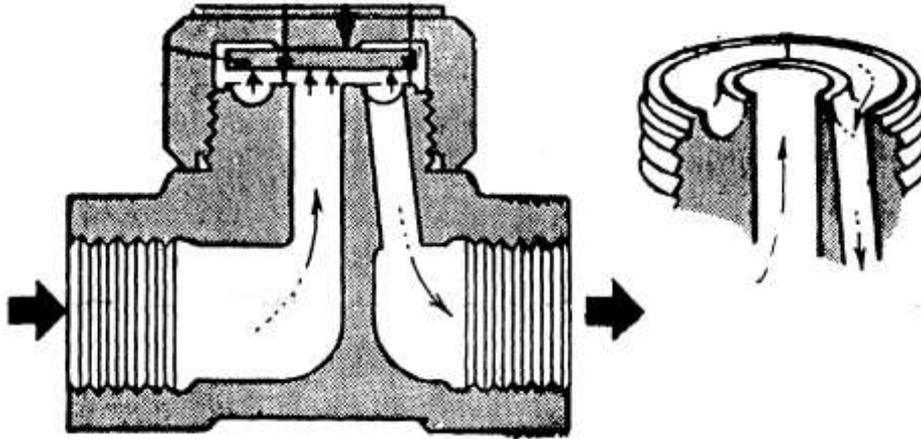


Figure I.16: Purgeur thermodynamique à disque [13]

b. Le purgeur thermodynamique à impulsion

Le purgeur thermodynamique à impulsion utilise un mécanisme sensible à la pression, tel qu'un petit piston ou une membrane. Lorsque la pression du condensat augmente, ce mécanisme s'actionne, ouvrant le clapet et permettant l'évacuation du condensat. Une fois la pression équilibrée, le mécanisme revient à sa position initiale, fermant ainsi le clapet pour éviter les fuites de vapeur. Ce processus se répète de manière cyclique pour une évacuation efficace des condensats. [13]

c. Purgeur thermodynamique à tuyère

Le purgeur thermodynamique à chicane ou à tuyère utilise un mécanisme sensible à la pression pour ouvrir le clapet lorsque la pression du condensat dépasse un seuil spécifique, permettant ainsi l'évacuation du condensat. Après stabilisation de la pression, le mécanisme se referme pour empêcher les fuites de vapeur. Ce cycle se répète régulièrement pour une évacuation efficace des condensats.[13]

I.9. Synthèse bibliographique

Rastegarpour et al [13], met en avant l'importance de récupérer la chaleur résiduelle des gaz de combustion des chaudières industrielles pour améliorer leur efficacité énergétique. Il propose un système innovant d'échangeur de chaleur à condensation et d'accumulation de chaleur, dont l'efficacité dépend de son exploitation. Pour optimiser les performances, un contrôleur prédictif de modèle non linéaire est utilisé, surpassant les méthodes conventionnelles et permettant d'économiser jusqu'à 6 % de carburant supplémentaire.

Fard et al [14], met en évidence l'importance cruciale de l'optimisation des caractéristiques de fonctionnement des chaudières industrielles, en particulier du traitement de l'eau d'alimentation, pour éviter des défaillances coûteuses et maximiser l'efficacité énergétique. Malgré des avancées significatives, les défis persistent, notamment en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre et d'exploration de sources de combustible alternatives. Des efforts de recherche intensifs sont nécessaires pour résoudre ces problèmes et améliorer l'impact environnemental de l'industrie des chaudières.

FENG et al [15], ont étudié l'efficacité de la capture du dioxyde de carbone dans les centrales électriques au charbon. Une intégration optimisée de ce système, comprenant un condenseur à membrane et un système de décarbonisation, est proposée. Cette approche minimise la consommation d'énergie et d'eau tout en augmentant l'efficacité thermique et énergétique de la centrale. La chaleur récupérée est utilisée pour chauffer le condensat du système de chauffage au charbon, ce qui améliore l'efficacité globale du processus. Des analyses détaillées sont effectuées pour évaluer l'impact des paramètres du condenseur à membrane sur la production d'énergie et les économies d'eau de refroidissement.

Luo et al [16], un réseau d'échangeurs de chaleur est crucial dans les usines pour récupérer la chaleur des processus. Il est étroitement lié au système d'utilité, notamment via la vapeur et le condensat de vapeur. Intégrer la récupération de chaleur dans la conception du REC peut réduire la consommation d'énergie pour le chauffage et le refroidissement. Une méthodologie est présentée pour synthétiser et concevoir simultanément un système d'utilité et un REC, avec une optimisation incluant des variables telles que la température de vapeur et la température de l'eau d'alimentation. Cette approche offre des avantages économiques significatifs par rapport aux méthodes de conception traditionnelles.

Men et al [17], examine les technologies permettant de récupérer la chaleur perdue des gaz de combustion à moyenne et basse température, en mettant l'accent sur les chaudières à condensation en tant que système clé. Bien que ces chaudières offrent un rendement élevé en

transférant la chaleur perdue à l'eau de retour, leur efficacité est limitée par la température de l'eau de retour. Des systèmes plus sophistiqués sont disponibles pour maximiser la différence de température entre la source froide et les gaz de combustion, classés en fonction de leurs principes de fonctionnement. Certains systèmes, comme la chaudière à pompe à vapeur, atteignent des rendements supérieurs à 80 % avec une période d'amortissement relativement courte.

En conclusion, les cinq articles présentés soulignent l'importance de l'efficacité énergétique et de la récupération de chaleur dans divers domaines industriels, en particulier dans les secteurs des chaudières industrielles. Les articles mettent en avant l'innovation technologique et les méthodes avancées de conception et d'optimisation pour améliorer les performances des systèmes de récupération de chaleur. Ils soulignent également les défis actuels, tels que la condensation, la réduction des émissions de gaz à effet de serre et l'exploration de sources de carburant alternatives, qui nécessitent des efforts continus en matière de recherche et de développement. Dans l'ensemble, ces articles témoignent d'une volonté d'utiliser les ressources énergétiques de manière plus efficace et de minimiser l'empreinte environnementale dans toute une série de secteurs industriels.

I.10. Conclusion

Ce premier chapitre a dressé un panorama des recherches et des avancements dans le domaine de l'optimisation de l'efficacité énergétique des systèmes de production de vapeur, en mettant particulièrement l'accent sur deux techniques clés : la récupération de condensat et l'intégration d'économiseurs dans le circuit des gaz d'échappement. L'examen des principes fondamentaux de ces méthodes a souligné leur potentiel significatif pour améliorer l'efficacité énergétique et réduire les coûts opérationnels.

La récupération de condensat permet la réutilisation de l'eau et de l'énergie thermique, apportant des avantages évidents en termes de conservation des ressources. De même, l'intégration d'économiseurs optimise l'utilisation de la chaleur résiduelle des gaz d'échappement pour préchauffer l'eau d'alimentation, renforçant ainsi l'efficacité globale des installations de chauffage. Néanmoins, des défis persistent, notamment l'intégration de ces technologies dans les infrastructures existantes, la gestion de la qualité du condensat et l'optimisation des paramètres opérationnels. La poursuite des recherches dans ces domaines est cruciale pour surmonter ces défis et maximiser les bénéfices potentiels de ces approches, c'est ce que nous allons aborder dans les prochains chapitres.

Chapitre II

Vu globale de la centrale de production et de distribution de vapeur

II.1. Introduction

La centrale de production de vapeur présentée ci-dessus est un système sophistiqué destiné à générer et distribuer de la vapeur saturée pour diverses applications industrielles. Cette figure (II.1) fournit une vue détaillée des différents composants ainsi que des flux de vapeur, d'eau et de condensats à travers l'installation.

Notre but est de mettre en évidence les ajouts et modifications effectués, tels que l'ajout de nouveaux purgeurs de condensat, l'amélioration des circuits de contrôle de la pression, et l'intégration de dispositifs supplémentaires pour la gestion de l'eau et de la vapeur. Il a pour un objectif de fournir une vue d'ensemble complète et fonctionnelle, facilitant ainsi la compréhension des opérations du système et permettant une analyse plus approfondie en vue d'une optimisation future.

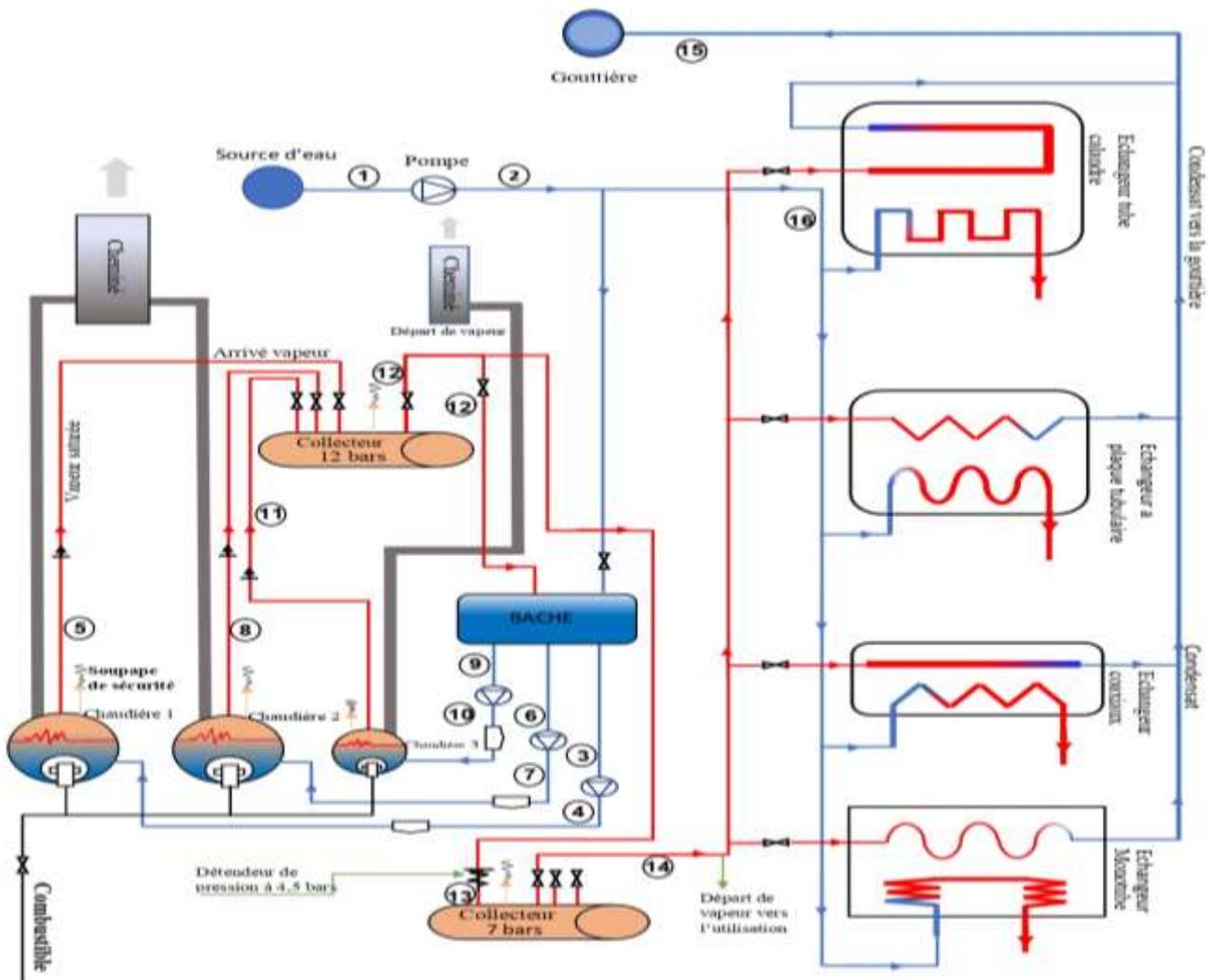


Figure II.17: Schéma 1 de la centrale de production et de distribution de vapeur actuelle

II.2. L'objectif des composants de cette centrale de production et de distribution de vapeur

L'objectif de cette centrale de production et de distribution de vapeur industrielle est de générer et de distribuer de la vapeur à différentes pressions pour diverses utilisations industrielles. Voici les principaux objectifs et fonctions illustrés par la figure II.1.

II.2.1. Chaudières

Les trois chaudières (Chaudière 1, Chaudière 2, et Chaudière 3) brûlent du combustible pour générer de la vapeur. Chaque chaudière est équipée de soupapes de sécurité pour prévenir les surpressions dangereuses.



Figure II.2: Les trois générateurs de vapeur CEVITAL

II.2.2. Pompe

Une pompe principale acheminer l'eau de la source d'eau vers la bache ensuite trois autre pompe alimentant les trois chaudières via un réseau de distribution.

II.2.3. Collecteur à vapeur 12 bars

La vapeur produite est collectée dans un collecteur à 12 bars, constituant une réserve de vapeur sous haute pression pour diverses applications

II.2.4. Régulation et Distribution de la Vapeur

a. Réduction de Pression

La vapeur à haute pression (10 bars) est réduite à 5 bars via un détendeur pour répondre aux besoins spécifiques des différentes applications.

b. Réseau de Distribution

La vapeur est acheminée à travers des conduites vers divers points d'utilisation, garantissant qu'elle est livrée à la pression et à la température appropriées.

II.2.5. Utilisations de la Vapeur**a. Échangeur monotube (pasteurisation)**

Pour la pasteurisation des produits dans l'industrie alimentaire.



Figure II.3: Échangeur monotubes CEVITAL

b. Échangeur à plaques tubulaires

Pour des transferts de chaleur efficaces avec des fluides industriels comme les jus.



Figure II.4: Échangeur à plaques tubulaires CEVITAL

c. Echangeur coaxiaux (double tube)

Les échangeurs coaxiaux assurent un transfert de chaleur efficace entre deux fluides via deux tubes concentriques, utilisée dans les systèmes de chauffage.



Figure II.5: Echangeur coaxiaux (double tube) CEVITAL

d. Echangeur tube calandre (pectine)

Permet le transfert thermique entre deux fluides. Des tubes disposés dans une structure en calandre permettent à un fluide chaud de circuler à l'intérieur tandis qu'un fluide plus froid passe entre les tubes optimisant ainsi l'échange de chaleur.



Figure II.6: Echangeurs tubes calandre (pectine) CEVITAL

II.3. Gestion du Condensat et de l'Eau

II.3.1. Bâche (Réservoir d'eau)

Recueille l'eau provenant de la source, elle agit comme un réservoir tampon pour l'eau d'alimentation des chaudières. L'eau stockée dans la bâche sera pompée vers les chaudières pour être convertie en vapeur.

II.3.2. Gouttière pour Condensat

Dans cette centrale le processus de récupération de condensat presque n'existe pas ils sont récupérés mais Évacue directement vers les égouts.

II.4. Sécurité et Fiabilité

Les soupapes de Sécurité Protègent le système en évitant les surpressions dans les chaudières.



Figure II.7: Les soupapes de Sécurité CEVITAL

II.5. Équipements de Régulation

Les détendeurs, vannes, et autres dispositifs assurent une distribution stable et sûre de la vapeur, réduisant les risques de problèmes liés à des variations de pression ou de température.

II.6. Description de fonctionnement de chaque composant de cette centrale à vapeur

II.6.1. Les pompes centrifuges

Les pompes centrifuges sont les plus répandues dans les industries de production et de traitement de l'énergie en raison de leur rendements élevés, la simplicité de leur conception, facilite leurs opérations de maintenance et d'entretien [18].

a. Principe de fonctionnement

Le principe de base des pompes centrifuges repose sur la mise en rotation du fluide à pomper en le faisant circuler dans une roue tournante à une vitesse plus ou moins élevée. Le fluide est admis au centre de la roue avec une pression dite pression d'aspiration. Lors de sa mise en rotation et de son déplacement vers la périphérie de la roue sa vitesse et son énergie cinétique augmentent. La pression dynamique qui en résulte augmente [18].

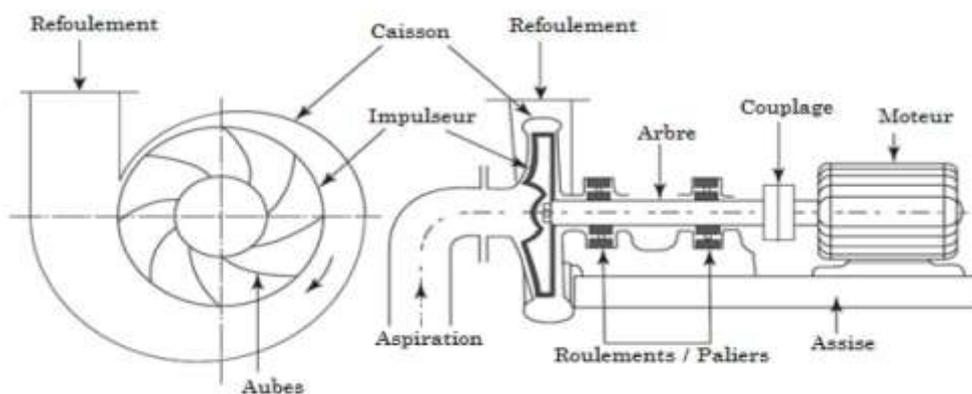


Figure II.8: Schéma d'une pompe centrifuge [18].

II.6.2. Bâche alimentaire

La bâche alimentaire est un réservoir d'eau, un élément de stockage thermique et un préparateur d'eau, elle doit avoir une capacité d'eau adéquate pour maintenir un approvisionnement continu dans le processus de traitement. Généralement, elle devrait pouvoir stocker suffisamment d'eau pour une heure de production de vapeur à plein régime de la chaudière. Pour les installations plus grandes, une option est d'avoir un réservoir plus petit avec un stockage d'eau traitée. De plus, sa capacité doit pouvoir gérer tout retour de condensat excédentaire.

Concernant sa forme, les bâches alimentaires sont généralement cylindriques et horizontales. Elles sont principalement fabriquées en acier au carbone, bien que l'acier inoxydable puisse être utilisé en option pour réduire les risques de corrosion.

La construction doit être solide avec des renforts adéquats pour éviter toute déformation excessive ou rupture. Les raccords doivent être dimensionnés pour faciliter le calorifugeage, et des anneaux de levage doivent être fixés pour une manipulation sécurisée.

La bache est protégée par une peinture antirouille et peut être calorifugée sur demande avec de la laine de roche.[19]

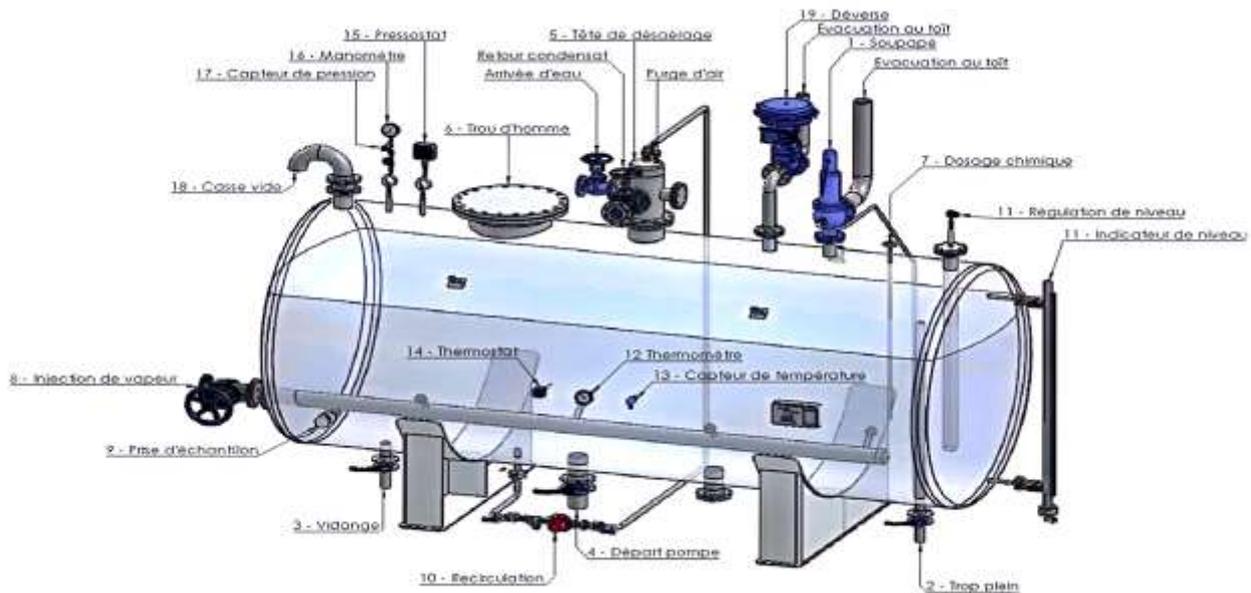


Figure II.9: Schéma représentatif de la composition d'une bache alimentaire [19]

II.6.3. Collecteur de vapeur

Réservoir horizontal de distribution de vapeur, fabriqué conformément à la réglementation algérienne relative aux équipements sous pression de vapeur (Décret exécutif N° 90-246 du 18/08/1990).

Fabriqué en tôle d'acier noir avec soudures réalisées par des soudeurs homologués, il est entouré de la laine de roche, de 80 mm d'épaisseur, et recouvert d'une enveloppe de protection externe, en tôle d'acier inoxydable, dans le but de minimiser les déperditions de chaleur.

Les calculs en rapport avec les parties sous pression, le choix des nuances d'acier de construction, les procédures de soudage ainsi que les diverses recommandations de sécurité relèvent du code de construction des générateurs de vapeur et de la norme algérienne NA 16687 équivalente à la norme européenne EN 12 953. Les accessoires de robinetterie et de régulation sont conformes aux normes internationales.[20]



Figure II.10: Collecteur à vapeur [20]

II.6.4. Détendeur de pression

Le détendeur RD10 se distingue par sa conception robuste et son action directe proportionnelle, le rendant idéal pour les applications industrielles exigeantes. Qu'il s'agisse de vapeur, d'air, d'eau ou de tout autre fluide compatible, le RD10 assure une régulation précise et stable en toutes circonstances.[21]



Figure II.11: Détendeur de pression [21]

II.6.5. Chaudière

La chaudière à vapeur tubes de fumées BWR est une chaudière à 3 parcours disposant d'une boîte de retournement aquatubulaire. Cette conception en acier est éprouvée et exclusive par Babcock Wanson permet une bonne circulation d'eau et évite ainsi les risques d'accumulation de boues dans le fond de la chaudière.

La Chaudière BWR offre une combinaison parfaite avec un brûleur pour une exploitation efficace et fiable. Son rendement est garanti jusqu'à 98% avec un économiseur de Babcock Wanson. Elle offre une consommation électrique réduite de 30 à 50% grâce à des brûleurs de nouvelle génération. Sa conception robuste et sa longue durée de vie, avec un risque d'encrassement interne minimisé. C'est un générateur de vapeur à haut rendement pour installations de chaufferie et de production de vapeur elle est de type à trois tours de fumées avec une flamme passante et une chambre d'inversion noyée.

Le foyer de la chaudière parcourt d'abord le fond, traverse la chambre d'inversion, puis prend le tube du deuxième parcours de fumées. Les fumées retournent ensuite vers la partie antérieure et empruntent le tube du troisième parcours de fumées. Une fois évacuées, elles sont récupérées dans la chambre postérieure et dirigées vers la cheminée. Cette séparation nette permet de réduire les émissions de Nox. Les brûleurs, compatibles avec divers carburants liquides et gazeux, peuvent être installés, montés sur une plaque avant revêtue à l'intérieur de réfractaire. L'entretien est facilité par les portes d'inspection des fumées, munies de charnières à l'avant et de boulons à l'arrière, ainsi que par un trou de poing d'inspection latéral et un trou d'homme. L'isolation thermique est assurée par des matelas en laine minérale à haute isolation, limitant les pertes thermiques. À l'extérieur, des panneaux en aluminium assurent la finition. Le tableau électrique précâblé, situé sur le côté de la chaudière, permet un fonctionnement automatique, avec le schéma électrique à l'intérieur du panneau de commandes. [22]

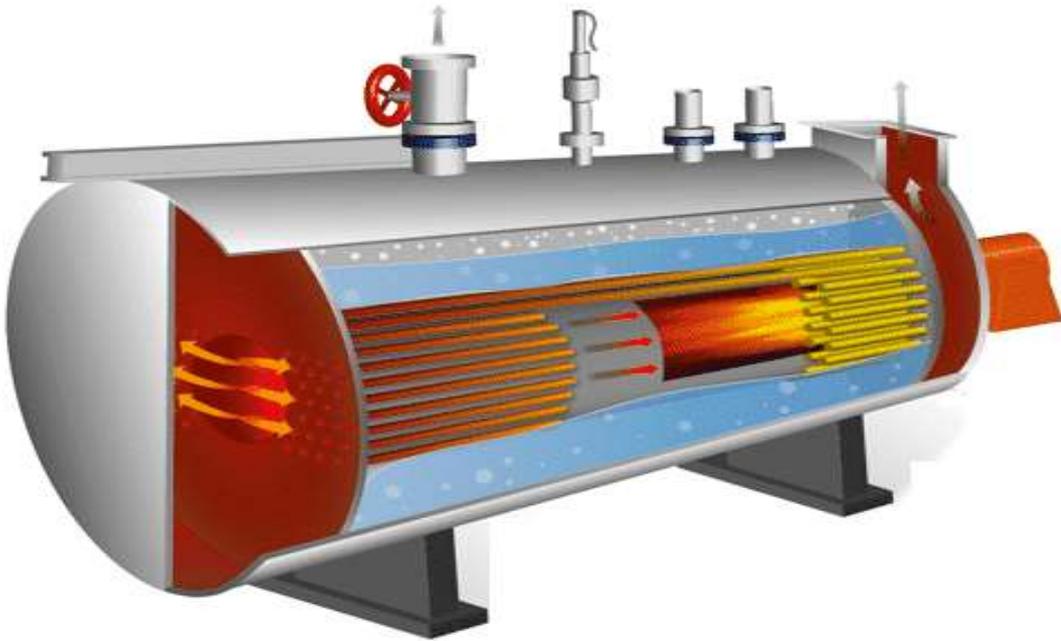


Figure II.12: Chaudière BWR [22]

II.7. Echangeur de chaleur

II.7.1. Echangeur tubulaire

On peut distinguer trois catégories principales d'échangeurs tubulaires selon le nombre de tube et leurs arrangements :

a. Echangeurs monotubes

Dans ce modèle d'échangeur, un tube est inséré à l'intérieur d'un réservoir et adopte généralement la configuration d'un serpent.



Figure II.13 : Echangeur thermique monotubes [23]

b. Echangeurs coaxiaux (double tube)

Un modèle d'échangeur de chaleur parmi les plus simples consiste en deux tubes concentriques (généralement cintrés). Dans ce dispositif, l'un des fluides circule à l'intérieur du tube central tandis que l'autre circule dans l'espace annulaire entre les deux tubes. Ces deux fluides peuvent circuler dans le même sens ou en sens contraire. Cependant, l'utilisation de ces appareils est limitée aux liquides sales, très chauds et de faibles débits.[24]



Figure II.14 : Echangeurs coaxiaux (double tube) [24]

c. Echangeur à tubes à calandre au chicanes

L'échangeur de chaleur le plus couramment utilisé actuellement est constitué d'un faisceau de tubes montés entre deux plaques tubulaires. Ces tubes comportent des chicanes, et à chaque extrémité du faisceau se trouvent des boîtes de distribution qui assurent la circulation des fluides à l'intérieur du faisceau en plusieurs passages. Le faisceau est logé dans une calandre équipée de tubulures d'entrée et de sortie pour le second fluide, qui circule à l'extérieur des tubes en suivant le chemin imposé par les chicanes.[25]

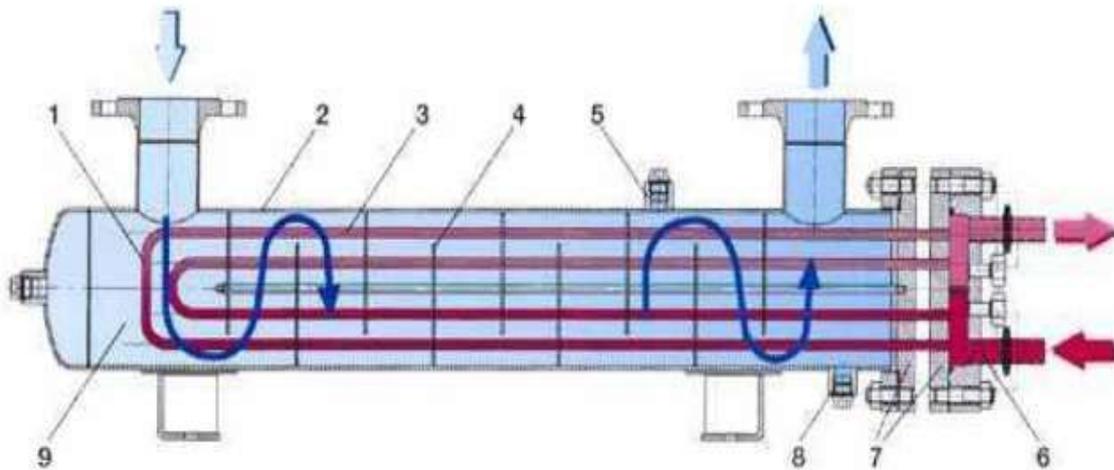


Figure II.15 : Schéma typique d'un échangeur tube calandre.[25]

Les noms des composants d'échangeur tube calandre :

- | | |
|--------------------------|---------------------------|
| 1. Faisceau tubulaire. | 6. Intérieur boîte à eau. |
| 2. Enveloppe (calandre). | 7. Plaque tubulaire. |
| 3. Intérieur tube. | 8. Raccord vidange. |
| 4. Chicane. | 9. Intérieur enveloppe. |
| 5. Raccord évent. | |

d. Echangeur à plaque

Le concept des échangeurs à plaques remonte au début du siècle. À l'origine, ces échangeurs ont été développés pour répondre aux besoins de l'industrie laitière, puis ont été adoptés dans diverses autres industries telles que la chimie, le nucléaire et l'agroalimentaire. Ils sont couramment utilisés pour des applications liquide-liquide, en ce qui concerne les échangeurs gaz-liquide ou air-air, la faible densité du gaz nécessite un débit inférieur à celui des liquides afin de maintenir la perte de charge à un niveau acceptable.[26]

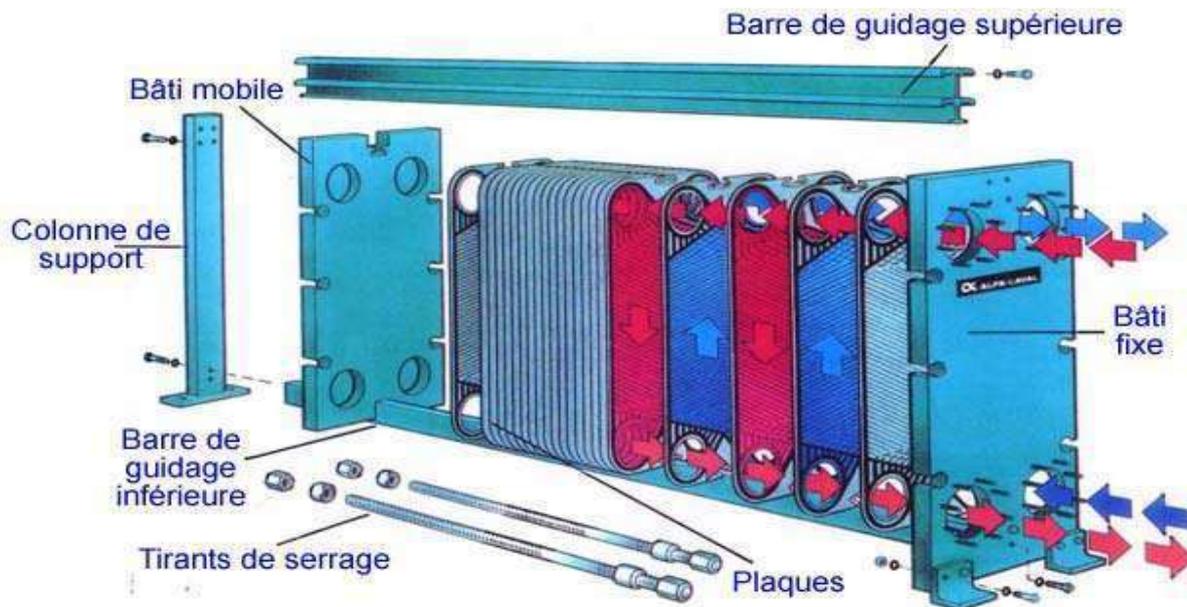


Figure II.16 : Composition d'un échangeur à plaques. [26]

II.8. L'objectif de notre étude

Objectif de notre étude sur cette centrale de production et de distribution de vapeur est de rechercher des moyens d'améliorer son efficacité énergétique. Pour ce faire, nous avons intégré plusieurs stratégies, notamment la récupération des condensats générés dans le processus de production de vapeur. De plus, nous examinons la possibilité d'incorporer un économiseur dans le circuit des gaz d'échappement afin de maximiser la récupération de chaleur, d'où la façon de faire cette stratégie est comme suite :

La première étape consiste à la récupération des condensats en intégrant des purgeurs dans chaque collecteur et dans les processus d'utilisation de vapeur ainsi dans la ligne de distribution de vapeur chaque 15 m et de les faire utiliser d'une manière fautive et correcte, ainsi l'installation des lignes de récupération de condensat alimenté vers la bache à eau, cette étape garantit une production de vapeur de haute qualité et une durabilité de la centrale.

La deuxième étape se résume à l'intégration d'un économiseur dans le cheminier dans le but de récupérer le maximum de chaleur des gaz d'échappement qui arrive à 300 degrés Celsius afin de préchauffer l'eau alimentée vers les chaudières.

Ces deux étapes sont illustrées dans le schéma (II.24) qui ont pour but d'assurer un fonctionnement sûr et fiable des chaudières à vapeur, des échangeurs de chaleur, les lignes de distribution de vapeur, ainsi de réduire les coûts liés à la production de vapeur, tels que la consommation d'eau et de gaz, les coûts de maintenance, les pertes de chaleur, d'optimiser ainsi le rendement global du système.

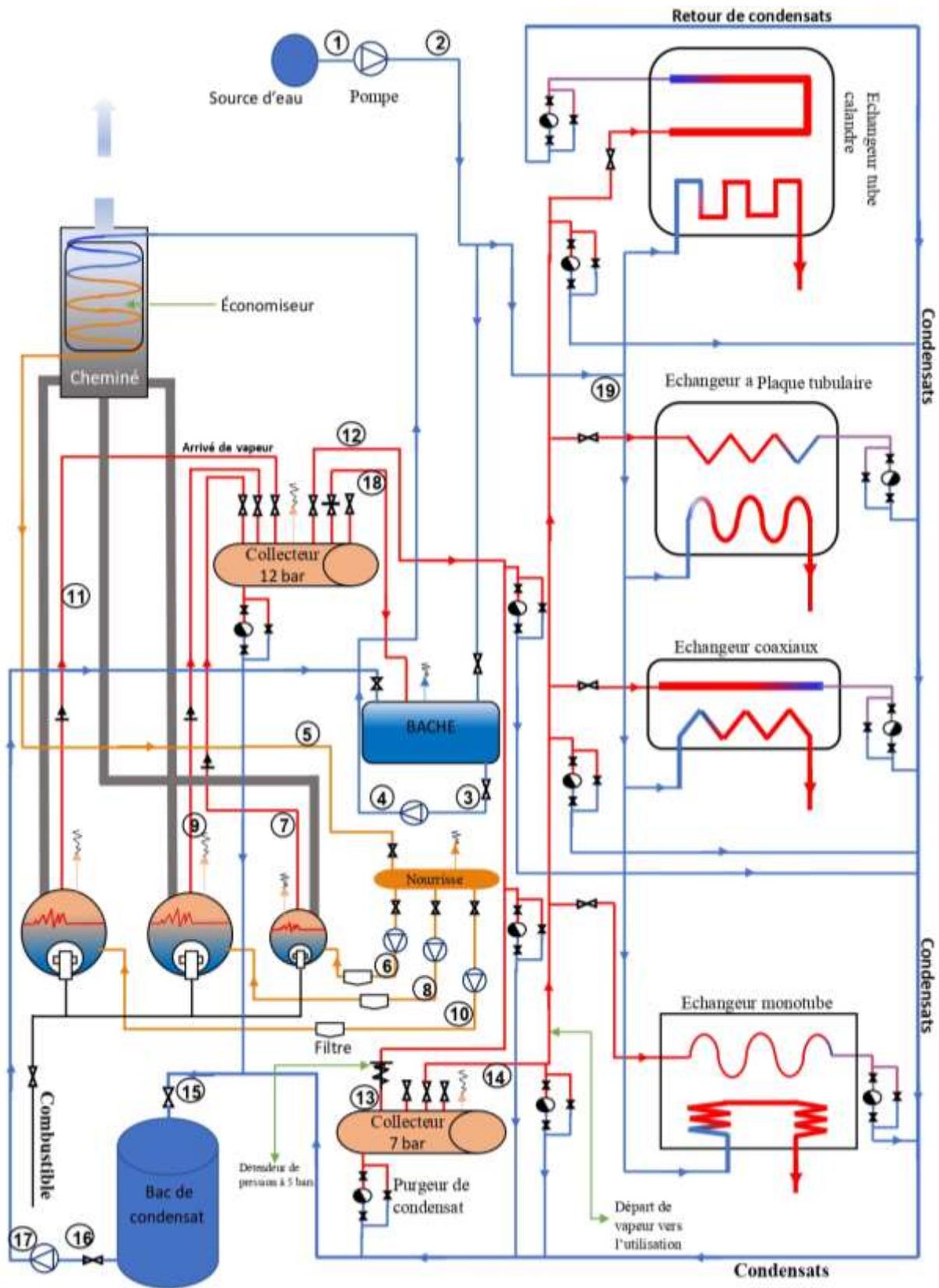


Figure II.17: schéma 2 de la centrale de production et de distribution vapeur après l'amélioration

Chapitre III

Bilans énergétiques et simulations

III.1. Introduction

Le premier principe de la thermodynamique, également connu sous le nom de principe de conservation de l'énergie, peut être formulé de diverses manières. Une première version de ce principe est la suivante : l'énergie se conserve, ce qui signifie qu'elle ne peut ni n'être créée ni détruite, mais seulement se transformer d'une forme à une autre.

III.2. Premier principe de thermodynamique

Si l'on considère que les échanges se font uniquement sous forme de chaleur (Q) et de travail mécanique (W), l'énergie totale échangée lors de la transformation d'un système, passant d'un état initial (EI) à un état final (EF), sera égale à la somme algébrique de Q et W. Cette énergie totale échangée (Q + W) est indépendante de la manière dont la transformation est réalisée. [27]

III.6. Bilan énergétique de détenteur

III.6.1. Premier principe de thermodynamique

Pour un détenteur fonctionnant en régime stationnaire, l'équation de la conservation de l'énergie se simplifie, car il n'y a ni travail effectué ni transfert de chaleur. [38]

$$Q - W + \dot{m} \left(h_1 + \frac{v_1^2}{2} + gZ_1 \right) = \dot{m} \left(h_2 + \frac{v_2^2}{2} + gZ_2 \right) \quad (\text{III.1})$$

$$\dot{m} h_1 = \dot{m} h_2 \quad (\text{III.2})$$

$$h_1 = h_2 \quad (\text{III.3})$$

Q : Quantité de chaleur

W : Le travail massique

\dot{m} : Le débit massique

V : La vitesse

g : La gravité

Z : L'altitude

h : L'enthalpie

III.6.2. Titre en vapeur

Le fluide est diphasique après le détendeur, il est important de calculer la qualité du mélange (x) afin de déterminer la proportion de vapeur et de liquide.

L'expression de titre de vapeur s'écrit [38] :

$$X_p = \frac{S_p - S_{p,Liq}}{S_{p,Vap} - S_{p,Liq}} \quad (\text{III.4})$$

S : L'entropie

III.7. Bilan énergétique de la bache alimentaire

Pour réaliser un bilan énergétique de la bache à eau, il faut analyser les entrées et les sorties d'énergie dans le système.

III.7.1. Premier principe de thermodynamique

Le premier principe de la thermodynamique appliqué à la bache à eau montre que l'énergie d'entrée égale à l'énergie d sortie. [29]

$$Q_e = Q_s \quad (\text{III.5})$$

Q : Quantité de chaleur

$$\dot{m}_e h_e = \dot{m}_s h_s \quad (\text{III.6})$$

\dot{m} : Le débit massique

h : L'enthalpie

III.8. Le bilan énergétique d'un économiseur

$$Q = \Delta H \quad (\text{III.7})$$

$$Q_{gaz,p} = Q_{eau,r} \quad (\text{III.8})$$

Q : Quantité de chaleur

ΔH : La différence d'enthalpie

III.8.2. La quantité de chaleur

La quantité de chaleur récupérée par l'eau s'écrit [29] :

$$Q_e = \dot{m}_e C_{pe} (T_{e,s} - T_{e,e}) \quad (\text{III.9})$$

La quantité de chaleur disponible dans les gaz d'échappement se trouve [29] :

$$Q_g = \dot{m}_g C_{pg} (T_{g,e} - T_{g,s}) \quad (\text{III.10})$$

III.8.3. La température de l'eau à la sortie de l'économiseur [38]

$$Q_e = \dot{m}_{eau} C_{p,e} (T_{eau,s} - T_{eau,e}) \quad (\text{III.11})$$

$$T_{eau,s} = \frac{Q_g}{(\dot{m}_e C_{p,e})} + T_{eau,e} \quad (\text{III.12})$$

III.9. Débit combustible

III.9.1. Débit combustible consommé schéma 2 [38]

$$\eta_{chaudière} = \frac{Q_{utile}}{Q_{comb}} \quad (\text{III.13})$$

$$Q_{utile} = q_m \Delta H \quad (\text{III.14})$$

$$Q_{comb} = \dot{m}_c PCI \quad (\text{III.15})$$

$$\dot{m}_{C2} = \frac{q_{m11} (h_{11} - h_{10}) + q_{m9} (h_9 - h_8) + q_{m7} (h_7 - h_6)}{\eta PCI} \quad (\text{III.16})$$

\dot{m} : Le débit massique

$\eta_{chaudière}$: rendement de la chaudière

PCI : pouvoir calorifique inférieur

III.9.2. Débit combustible consommé de schéma 1 sans soutirage de vapeur 12' [38]

$$\dot{m}_{C1'} = \frac{q_{m5} (h_5 - h_4) + q_{m8} (h_8 - h_7) + q_{m11} (h_{11} - h_{10})}{\eta PCI} \quad (\text{III.17})$$

III.9.3. Débit combustible consommé avec soutirage de vapeur 12' [38]

$$\dot{m}_{c12'} = \dot{m}_{c1'} - \dot{m}_{c1} \quad (\text{III.18})$$

III.9.4. Débit combustible consommé réel de schéma 2 [38]

$$\dot{m}_{c2,r\acute{e}el} = \dot{m}_{c2} - \dot{m}_{c12'} \quad (\text{III.19})$$

III.10. Interprétation et discussions

Dans notre étude, la finalité est de récupérer un maximum de chaleur perdue dans le circuit des gaz d'échappement en intégrant un économiseur dans la cheminée de la chaudière et en récupérant le condensat vers la bache alimentaire. Nous avons ainsi effectué une simulation des deux schémas (schéma 1 existant et schéma 2 proposé) présentés ci-dessus à l'aide du logiciel Engineering Equation Solver. La finalité est d'observer la variation de l'entropie en fonction de la température, ainsi que de calculer les enthalpies et les titres en vapeur pour déterminer l'état à chaque point de changement de phase de la vapeur. Les résultats obtenus sont les suivants

Tableau III.1 : Table des paramètres thermodynamiques selon les points de schéma 1

| | H [kJ/kg] | S [kJ/kg.°C] | P [Bar] | T [°C] |
|------|---------------------|------------------------|-------------------|------------------|
| [1] | 104.9 | 0.3672 | 1 | 25 |
| [2] | 105 | 0.3672 | 2 | 25 |
| [3] | 251.3 | 0.8312 | 2 | 60 |
| [4] | 252.5 | 0.8305 | 16 | 60 |
| [5] | 2788 | 6.61 | 10 | 184.1 |
| [6] | 251.3 | 0.8312 | 2 | 60 |
| [7] | 252.5 | 0.8305 | 16 | 60 |
| [8] | 2788 | 6.61 | 10 | 184.1 |
| [9] | 251.3 | 0.8312 | 2 | 60 |
| [10] | 252.5 | 0.8305 | 16 | 60 |
| [11] | 2788 | 6.61 | 10 | 184.1 |
| [12] | 2788 | 6.61 | 10 | 184.1 |
| [13] | 622.9 | 1.82 | 4.5 | 147.8 |
| [14] | 622.9 | 1.82 | 4.5 | 147.8 |
| [15] | 335 | 1.076 | 0.5 | 80 |

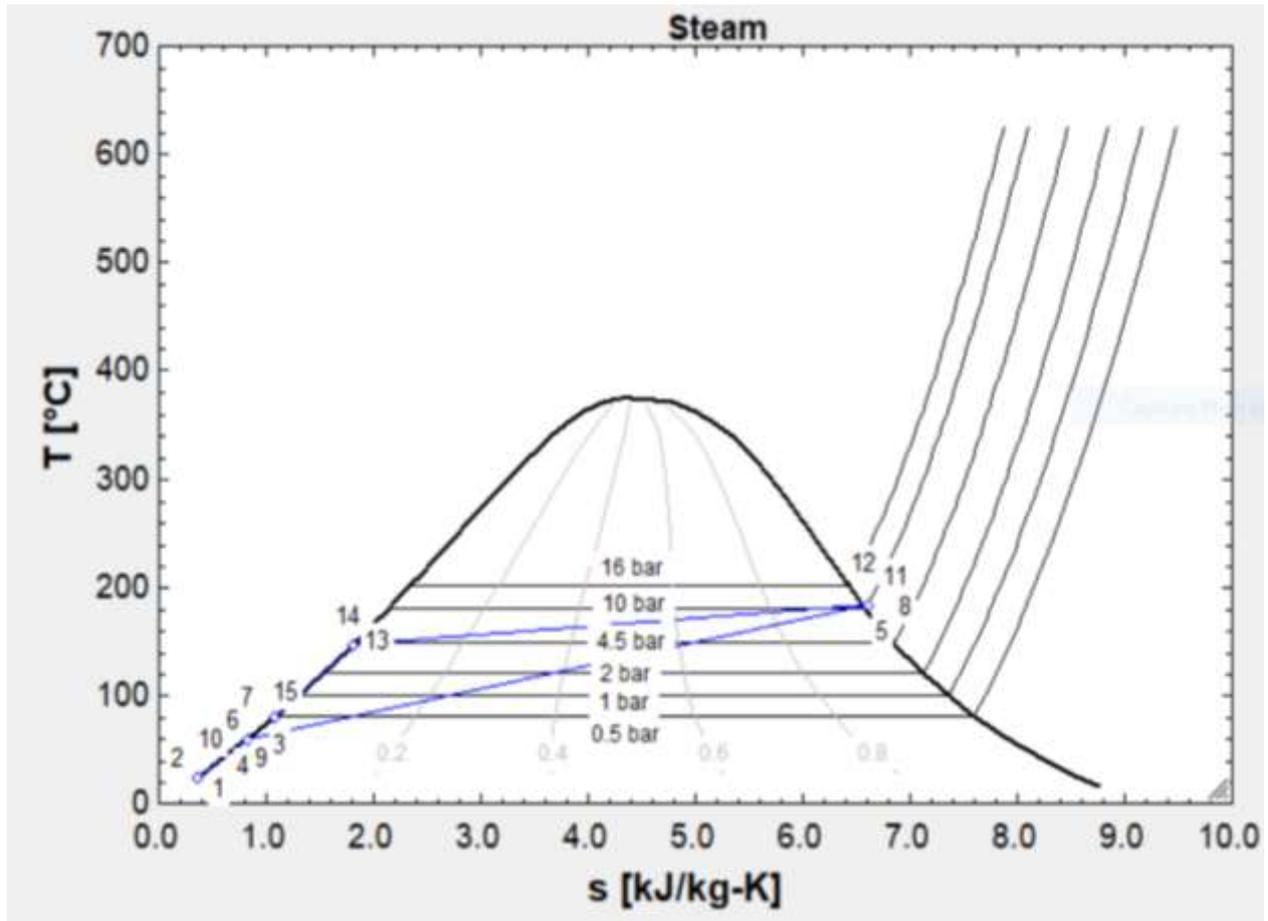


Figure III.1 : Diagramme [T, S] des paramètres thermodynamiques obtenus du tableau III.1

La tableau III.1 présente les paramètres thermodynamiques tels que la température (T), l'entropie (S), la pression (P) et l'enthalpie (H) aux différents points indiqués dans le Schéma 1. Chaque point correspond à une étape spécifique du processus de production et de distribution de vapeur, les donnée (température et pression) des points 1 jusqu'à 15 sont des paramètres existants actuellement dans cette centrale de production et de distribution de vapeur, Le Diagramme [TS] 1 illustre ensuite les variations de l'entropie (S) en fonction de la température (T) pour ces points, en analysant ses résultats on a trouvé que le point 13 est à l'état liquide saturée alors que il aurait dû être de la vapeur saturée pour un rendement efficace des échangeur, cela est dû à la baisse de température lors de la détente de pression jusqu'à 4,5 bar à la rentré de collecteur 7 bar.

Tableau III.2 : table des paramètres thermodynamiques selon les points indiqués sur le schéma 2

| | H [kJ/kg] | S [kJ/kg. °C] | P [Bar] | T [°C] |
|------|---------------------|-------------------------|-------------------|------------------|
| [1] | 104.9 | 0.3672 | 1 | 25 |
| [2] | 105 | 0.3672 | 2 | 25 |
| [3] | 182.2 | 0.6188 | 0.5 | 43.5 |
| [4] | 182.3 | 0.6188 | 2 | 43.5 |
| [5] | 311.6 | 1.008 | 2 | 74.4 |
| [6] | 312.8 | 1.008 | 16 | 74.4 |
| [7] | 2788 | 6.61 | 10 | 184 |
| [8] | 312.8 | 1.008 | 16 | 74.4 |
| [9] | 2788 | 6.61 | 10 | 184 |
| [10] | 312.8 | 1.008 | 16 | 74.4 |
| [11] | 2788 | 6.61 | 10 | 184 |
| [12] | 2788 | 6.61 | 10 | 184 |
| [13] | 2765 | 6.86 | 5 | 159 |
| [14] | 2765 | 6.86 | 5 | 159 |
| [15] | 335.1 | 1.076 | 1 | 80 |
| [16] | 335.1 | 1.076 | 1 | 80 |
| [17] | 335.1 | 1.075 | 2 | 80 |

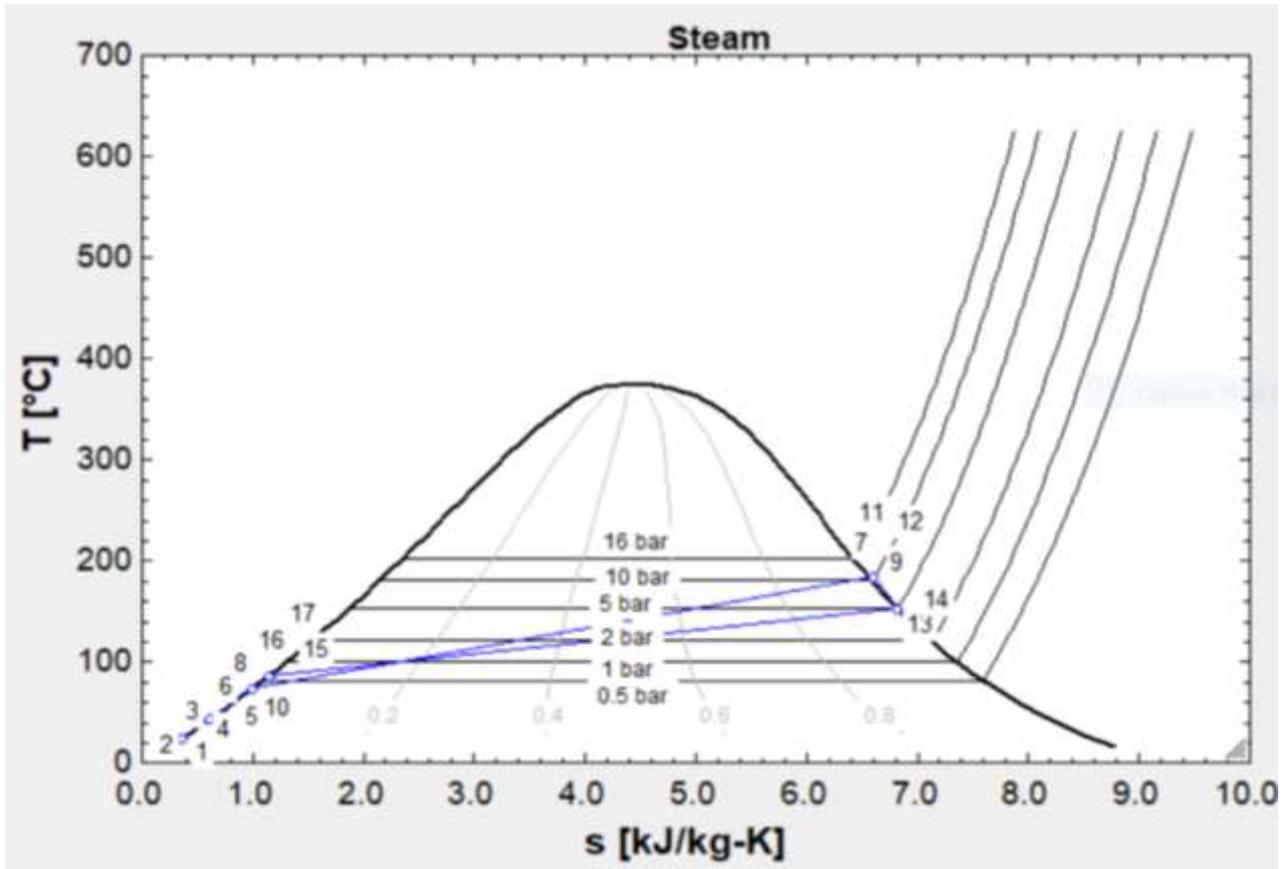


Figure III.2 : Diagramme [T, S] des paramètres thermodynamiques obtenus du tableau III.2

Le diagramme [TS] 2 illustre les variations de l'entropie en fonction de la température pour tous les points du Tableau III.2, permettant ainsi de comparer les transformations thermodynamiques avant et après les améliorations apportées au système. Dans ce cycle, le point 13 est à l'état de vapeur saturée en raison de l'augmentation de la pression à 5 bars et de la température à 151,8 °C, des facteurs essentiels pour le changement de phase de la vapeur. Cette augmentation a été effectuée afin que la vapeur soit toujours saturée.

L'augmentation de la température à l'entrée de la chaudière, qui passe de 60 °C à 73,35 °C, résulte de l'intégration d'un économiseur et de la récupération du condensat. Le condensat récupéré à une température de 86 °C et un débit massique de 7,6 t/h représentent un profit de 1596 DA pendant 3h30min, après environ 3h30min de début de production de vapeur, la récupération de condensat atteindra les 95% de débit massique d'eau consommé par les trois chaudières qui est 25 t/h, ce qui fait un profit de 1423,2 DA/h estimant 5% de perte par purge cette récupération est dirigée vers la bêche alimentaire pour préchauffer l'eau d'alimentation et à son tour d'acheminer les trois chaudières. En parallèle, l'économiseur récupère la chaleur des gaz d'échappement pour préchauffer

l'eau qui sort de la bache est acheminer vers les trois chaudières, réduisant ainsi la consommation de gaz naturel nécessaire à la production de 600 tonnes de vapeur en 24 heures, passant de $51136,12m^3$ à $46878,3 m^3$, soit un gain de $4257,82 m^3$ en 24 heures, équivalent à un profit de 20370,25 DA/24H. La fermeture de la ligne de distribution de vapeur le point 12' dédiée au préchauffage de l'eau de la bache permet de récupérer cette vapeur implique la réduction de débit de combustible consommé.

Cette optimisation globale permet de maximiser l'utilisation de la vapeur produite par la chaudière pour les processus industriels, améliorant significativement l'efficacité énergétique et réduire les coûts liés à la production de vapeur, tels que la consommation d'eau et de gaz, les coûts de maintenance, les pertes de chaleur, d'optimiser ainsi le rendement global de système.

III.11. Conclusion

Ce chapitre illustre concrètement l'application du premier principe de la thermodynamique à divers systèmes énergétiques. Il souligne l'importance de l'efficacité énergétique et des techniques de conversion d'énergie. Maîtriser ces principes est essentiel pour optimiser les performances des systèmes thermodynamiques, réduire les pertes d'énergie et améliorer l'efficacité globale.

Notre analyse approfondie de cette centrale de production de vapeur a mis en évidence l'importance cruciale de chaque composant dans le fonctionnement global de la centrale. En examinant attentivement les fonctions spécifiques de la chaudière, les pompes, l'économiseur, des échangeurs de chaleur, détenteur, bache alimentaire, nous avons souligné leur contribution indispensable à la création, ainsi en a calculer le volume de consommation de gaz pour les trois chaudières.

Cette étude a démontré l'efficacité de l'intégration d'un économiseur dans la cheminée de la chaudière et de la récupération du condensat vers la bache alimentaire pour maximiser la récupération de chaleur perdue. Les résultats montrent que les optimisations apportées dans le schéma 2 améliorent significativement l'efficacité du système de production et de distribution de vapeur par rapport au schéma 1.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

L'optimisation de l'efficacité énergétique des systèmes de production de vapeur est devenue un enjeu essentiel pour l'industrie moderne. Ces systèmes jouent un rôle crucial dans de nombreux secteurs industriels, tels que l'agroalimentaire, la chimie, la pharmacie, et les industries de transformation, en raison de leur impact significatif sur les coûts opérationnels et l'environnement. Lors de notre étude pratique de 60 jours en usine, nous avons identifié des problèmes majeurs, notamment la perte de condensats non récupérés et le gaspillage d'énergie des gaz d'échappement, dus à des inefficacités opérationnelles et à des coûts élevés en gaz et en eau.

Pour remédier à ces défis, nous avons recommandé l'utilisation de vapeur saturée au point de production, la récupération accrue des condensats jusqu'à 95%, et l'installation d'économiseurs sur les cheminées pour optimiser l'utilisation de la chaleur résiduelle. En outre, l'introduction de capteurs intelligents et de systèmes de contrôle automatisés pour surveiller et ajuster en temps réel les paramètres de production pourrait également améliorer l'efficacité énergétique. La mise en œuvre de programmes de formation continue pour le personnel technique afin de garantir une gestion optimale des équipements de production de vapeur est également cruciale.

Les résultats obtenus ont démontré une optimisation significative du cycle de production de vapeur, améliorant la qualité des processus industriels tout en permettant des économies estimées à environ 12 millions 500 mille dinars sur la consommation d'eau et environ 7 millions 500 milles dinar par année sur la consommation de gaz naturelle par les trois chaudières, de plus, l'amélioration de l'efficacité énergétique contribue à prolonger la durée de vie des équipements, à réduire les coûts de maintenance et à diminuer les temps d'arrêt de production.

Notre étude vise à répondre aux exigences croissantes de rentabilité économique tout en réduisant l'empreinte environnementale des processus industriels.

Cette étude met en évidence l'opportunité stratégique d'améliorer l'efficacité énergétique des systèmes de production de vapeur, non seulement pour atteindre des objectifs économiques et environnementaux, mais aussi pour renforcer l'engagement envers la durabilité industrielle à long terme. Elle offre des perspectives prometteuses pour l'avenir de la production de vapeur,

encourageant une transition vers des pratiques industrielles plus efficaces et respectueuses de l'environnement. De plus, la collaboration avec des partenaires technologiques et l'investissement dans la recherche et le développement continueront de jouer un rôle clé dans l'innovation et l'amélioration continue des systèmes de production de vapeur. Aux finales nous avons pu attendre à optimiser environ 20 millions dinars par année entre le combustible et le condensat.

Références Bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Einstein, Dan, Worrell, Ernst, Khrushch, Marta (Steam systems in industry) 2001-07-22.
- [2] Baen, P.R. and R.E. Barth. 1994. "Insulate Heat Tracing Systems Correctly." *Chemical Engineering Progress*, September, pp.41-46.
- [3] Mehdi, A. Mémoire de master. « Influence du milieu et la qualité d'eau sur le comportement électrochimique de deux nuances d'acier au carbone » Université de Skikda, 2018.
- [4] Bounab. W. Houtia M. Mémoire de master en génie des procédés. « Etude préventive sur la corrosion et disfonctionnement des chaudières au niveau de la raffinerie d'Adrar » Université d'Adrar, 2020.
- [5] PARTNERS-KDA-Rév.0-01-2008.
- [6] Deghal Née Cheridi Amina Lyria, "Etude numérique du transitoire accidentel d'une chaudière industrielle par le Code RELAP5/MODE3.2", Thèse de doctorat, Université Constantine 1, 2013.
- [7] Christophe. A, « Chaudières à vapeur à combustible ». Enseignant de BTS CIRA Lycée Pilote Innovant », Édition du 2007.
- [8] Formation industrie Sonatrach, « chaudières industrielles » Institut National de pétrole école de Skikda, 2012.
- [9] Deghal Née Cheridi Amina Lyria, "Etude numérique du transitoire accidentel d'une chaudière industrielle par le Code RELAP5/MODE3.2", Thèse de doctorat, Université Constantine 1, 2013.
- [10] Kharref, S. Mémoire de magister en chimie appliquée. « Comportement électrochimique de l'acier A105 dans différents milieux » Université de Skikda, 2008.
- [11] G. Sylvain, ' Diagnostic du colmatage des générateurs de vapeur à l'aide de modèles physiques et statistiques', thèse Doctorat, ENM, Paris, France, 2012.
- [12] Chapitre 1 - Ensemble BOP / Ilots de Puissance et Communs, programme de formation BOP (Balance Of Plant) Volet OPÉRATION, 2008, 467 pages.
- [13] RASTEGARPOUR, Soroush, MARIOTTI, Andrea, FERRARINI, Luca, et al. Amélioration de l'efficacité énergétique des chaudières industrielles grâce à un système de récupération de chaleur par

condensation des fumées avec approche MPC non linéaire. Génie Thermique Appliqué, 2023, vol. 229, p. 120554. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120554>

[14] FARD, Mahdi Sanavi et SHOKRI, Aref. Principes, défis opérationnels et perspectives dans le processus de traitement de l'eau d'alimentation des chaudières. Avancées environnementales, 2023, p. 100389. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100389>

[15] FENG, Lingjie, ZHAI, Rongrong, ZHAO, Yingxin *et al.* Optimisation intégrée d'une centrale électrique au charbon et d'un système de captage du CO₂ couplé à un condenseur à membrane pour la récupération de l'énergie hydrothermale des fumées. Conversion et gestion de l'énergie, 2023, vol. 278, p. 116689. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116689>

[16] LUO, Xianglong, HUANG, Xiaojian, EL-HALWAGI, Mahmoud M., *et al.* Synthèse simultanée du système de services publics et du réseau d'échangeurs de chaleur intégrant le condensat de vapeur et l'eau d'alimentation de la chaudière. Énergie, 2016, vol. 113, p. 875-893.

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.109>

[17] MEN, Yiyu, LIU, Xiaohua, et ZHANG, Tao. Un examen des technologies de récupération de chaleur résiduelle des chaudières dans la plage de températures moyennes-basses. Énergie, 2021, vol. 237, p. 121560. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121560>

[18] ENSPM (école national supérieure de pétrole et des moteurs) « Pompes, technologie et Fonctionnement des pompes centrifuge » L'institut française de pétrole. PARIS. Guide de formation industrielle – IFP training-2005.

[19] Documentation société spirax sacro.

[20] Documentation société ECFERAL.

[21] Société SECTORIEL S.A, 45 rue du Ruisseau, 38290 SAINT QUENTIN-FALLAVIER – FRANCE.

[22] Documentation société Babcock Wanson.

[23] Documentation société PIGNAT 6, rue Calmette 69740 GENAS France.

[24] Documentation société SACOME, Cartagena, Murcia, Espagne.

[25] J.F. Saccadura. "Initiation aux transferts thermiques", 4^{ème} tirage paris, 1993.

- [26] A. Bontemps, A. Garrigue, C. Goubier, J. Huetz, C. Marvillet, R. Vidil « Description des échangeurs de chaleur », techniques de l'ingénieur [B2341], 2012.
- [27] Moulay Rachid. Laamari, cours de thermochimie université Cadi Ayyad, septembre 2016.
- [28] B. Salamito. Physique tout-en-un, PCSI. Dunod, 2016.
- [29] David. R, « Développement de Piles à Combustion de Type SOFC, Conventionnelles et Mono-Chambres, en Technologie Planaire par Sérigraphie », Thèse Doctorat, l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, Génie des Procèdes, 2005.
- [30] MOHAMMEDI. HASSAINI, (Etude énergétique d'un générateur de vapeur de la section désodorisation des huiles alimentaires) , thème master, Université A. Mira Bejaia,2019.
- [31] El-Ghayoury Mohamed, ' ' Le bilan thermique de la chaudière au sein de EL ALF Fès' ' , projet fin d'étude, université Sidi Mohamed ben Abdellah 2019.
- [32] Borel. L, « Thermodynamique et énergétique », Volume 2-Presses Polytechniques et Universitaires, Romandes ,2008.
- [33] Padet.J, Echangeurs de chaleur- Méthode globales de calcul avec 11 problèmes résolus, Reims, 1994.
- [34] RIAD.A, « Optimisation énergétique des deux chaudières auxiliaires à la centrale Thermoélectrique » , Mémoire de Master Science Technologie Université sidi Mohamed Ben Abdelah,2012.
- [35] Marie Paule Bassez, « le premier principe de thermodynamique », université de Strasbourg.
- [36] Djellali Badis, Djebabla Basma, Analyse Des Causes De Défaillance des Pompes Centrifuges, mémoire master 2021, Université Badji Mokhtar- Annaba.
- [37] Bouzid Feriel, simulation thermique d'un échangeur de chaleur a faisceau tubulaire et calandre, mémoire master 2021, Université Badji Mokhtar – Annaba.
- [38] Lucien Borel « thermodynamique et énergétique » , éditions presses polytechniques Romandes, 1987.

ANNEXES

Annexe A : Table thermodynamique de l'eau

| Table thermodynamique de l'eau | | | | | | | |
|--------------------------------|-------------|--|--|------------------------------|------------------------------|---|---|
| T_e (°C) | P_e (bar) | v_l (dm ³ .kg ⁻¹) | V_g (dm ³ .kg ⁻¹) | h_l (kJ.kg ⁻¹) | h_g (kJ.kg ⁻¹) | s_l (kJ.K ⁻¹ .kg ⁻¹) | s_g (kJ.K ⁻¹ .kg ⁻¹) |
| 0 | 0,0061 | 0,9999 | 206199,03 | -333,53 | 2501,01 | -1,2212 | 9,156 |
| 5 | 0,0087 | 1,0001 | 147128,02 | 20,43 | 2510,22 | 0,0741 | 9,0254 |
| 10 | 0,0123 | 1,0005 | 106385,25 | -41,1 | 2519,42 | 0,1478 | 8,9005 |
| 15 | 0,0171 | 1,0013 | 77931,21 | 61,92 | 2528,59 | 0,2207 | 8,7811 |
| 20 | 0,0234 | 1,0022 | 57794,18 | 82,87 | 2537,74 | 0,2928 | 8,6669 |
| 25 | 0,0317 | 1,0034 | 43358,56 | 104,13 | 2546,85 | 0,3647 | 8,5576 |
| 30 | 0,0425 | 1,0047 | 32892,68 | 125,22 | 2555,92 | 0,4348 | 8,453 |
| 35 | 0,0563 | 1,0063 | 25215,39 | 146,33 | 2564,96 | 0,5039 | 8,3527 |
| 40 | 0,0738 | 1,0081 | 19522,6 | 167,46 | 2573,94 | 0,5719 | 8,2566 |
| 45 | 0,0959 | 1,0101 | 15257,85 | 188,58 | 2582,87 | 0,6388 | 8,1644 |
| 50 | 0,1235 | 1,0123 | 12031,59 | 209,69 | 2591,74 | 0,7046 | 8,0759 |
| 55 | 0,1576 | 1,0146 | 9568,2 | 230,78 | 2600,54 | 0,7694 | 7,9909 |
| 60 | 0,1994 | 1,0172 | 7670,58 | 251,84 | 2609,27 | 0,8331 | 7,9092 |
| 65 | 0,2503 | 1,0199 | 6196,46 | 272,88 | 2617,92 | 0,8957 | 7,8306 |
| 70 | 0,3119 | 1,0228 | 5042,08 | 293,89 | 2626,48 | 0,9574 | 7,755 |
| 75 | 0,3858 | 1,0258 | 4131,17 | 314,88 | 2634,96 | 1,0181 | 7,6821 |
| 80 | 0,4739 | 1,0291 | 3407,1 | 335,86 | 2643,33 | 1,0779 | 7,6119 |
| 85 | 0,5783 | 1,0325 | 2827,53 | 356,82 | 2651,61 | 1,1368 | 7,5441 |
| 90 | 0,7014 | 1,036 | 2360,52 | 377,78 | 2659,77 | 1,1949 | 7,4787 |
| 95 | 0,8455 | 1,0397 | 1981,83 | 398,74 | 2667,81 | 1,2521 | 7,4156 |
| 100 | 1,0135 | 1,0436 | 1672,87 | 419,71 | 2675,72 | 1,3087 | 7,3546 |
| 105 | 1,2082 | 1,0476 | 1419,33 | 440,7 | 2683,51 | 1,3645 | 7,2955 |
| 110 | 1,4327 | 1,0518 | 1210,12 | 461,72 | 2691,15 | 1,4197 | 7,2384 |
| 115 | 1,6906 | 1,0561 | 1036,56 | 482,78 | 2698,64 | 1,4742 | 7,183 |
| 120 | 1,9853 | 1,0606 | 891,84 | 503,89 | 2705,98 | 1,5282 | 7,1293 |
| 125 | 2,3207 | 1,0652 | 770,58 | 525,06 | 2713,14 | 1,5816 | 7,0772 |
| 130 | 2,7009 | 1,07 | 668,49 | 546,28 | 2720,13 | 1,6345 | 7,0266 |
| 135 | 3,1301 | 1,075 | 582,16 | 567,58 | 2726,94 | 1,6868 | 6,9774 |
| 140 | 3,6129 | 1,0801 | 508,84 | 588,95 | 2733,54 | 1,7388 | 6,9296 |
| 145 | 4,154 | 1,0854 | 446,31 | 610,41 | 2739,94 | 1,7902 | 6,883 |
| 150 | 4,7584 | 1,0909 | 392,77 | 631,95 | 2746,12 | 1,8413 | 6,8376 |
| 155 | 5,4314 | 1,0965 | 346,75 | 653,58 | 2752,06 | 1,8919 | 6,7932 |
| 160 | 6,1782 | 1,1024 | 307,05 | 675,3 | 2757,76 | 1,9422 | 6,7499 |
| 165 | 7,0047 | 1,1084 | 272,68 | 697,12 | 2763,2 | 1,9921 | 6,7075 |
| 170 | 7,9166 | 1,1146 | 242,82 | 719,04 | 2768,37 | 2,0416 | 6,666 |
| 175 | 8,9201 | 1,121 | 216,79 | 741,06 | 2773,26 | 2,0907 | 6,6254 |
| 180 | 10,0213 | 1,1276 | 194,04 | 763,18 | 2777,84 | 2,1395 | 6,5854 |
| 185 | 11,227 | 1,1345 | 174,08 | 785,41 | 2782,1 | 2,188 | 6,5462 |
| 190 | 12,5436 | 1,1416 | 156,33 | 807,74 | 2786,04 | 2,2362 | 6,5076 |
| 195 | 13,9782 | 1,1489 | 141,04 | 830,18 | 2789,63 | 2,284 | 6,4695 |
| 200 | 15,538 | 1,1565 | 127,35 | 852,74 | 2792,85 | 2,3315 | 6,432 |
| 205 | 17,2301 | 1,1644 | 115,2 | 875,41 | 2795,7 | 2,3788 | 6,3949 |
| 210 | 19,0622 | 1,1726 | 104,4 | 898,21 | 2798,15 | 2,4258 | 6,3582 |
| 215 | 21,0421 | 1,181 | 94,78 | 921,13 | 2800,18 | 2,4725 | 6,3218 |
| 220 | 23,1776 | 1,1899 | 86,18 | 944,19 | 2801,78 | 2,519 | 6,2857 |
| 225 | 25,4768 | 1,199 | 78,48 | 967,4 | 2802,93 | 2,5652 | 6,2499 |
| 230 | 27,9483 | 1,2086 | 71,57 | 990,77 | 2803,61 | 2,6113 | 6,2143 |
| 235 | 30,6004 | 1,2185 | 65,36 | 1014,1 | 2803,81 | 2,6568 | 6,1789 |
| 240 | 33,4419 | 1,2289 | 59,76 | 1037,81 | 2803,49 | 2,7026 | 6,1434 |
| 245 | 36,4819 | 1,2398 | 54,7 | 1061,72 | 2802,62 | 2,7482 | 6,1081 |
| 250 | 39,7294 | 1,2511 | 50,13 | 1085,85 | 2801,2 | 2,7938 | 6,0727 |
| 255 | 43,1939 | 1,263 | 45,97 | 1110,22 | 2799,19 | 2,8393 | 6,0372 |
| 260 | 46,885 | 1,2755 | 42,2 | 1134,85 | 2796,56 | 2,8849 | 6,0017 |
| 265 | 50,8125 | 1,2886 | 38,77 | 1159,78 | 2793,29 | 2,9305 | 5,9659 |
| 270 | 54,9865 | 1,3024 | 35,64 | 1185,01 | 2789,33 | 2,9761 | 5,9299 |
| 275 | 59,4173 | 1,317 | 32,78 | 1210,58 | 2784,65 | 3,0219 | 5,8935 |
| 280 | 64,1157 | 1,3324 | 30,17 | 1236,52 | 2779,21 | 3,0679 | 5,8568 |
| 285 | 69,0925 | 1,3488 | 27,77 | 1262,87 | 2772,94 | 3,1141 | 5,8196 |
| 290 | 74,359 | 1,3661 | 25,57 | 1289,64 | 2765,8 | 3,1606 | 5,7819 |
| 295 | 79,927 | 1,3845 | 23,54 | 1316,88 | 2757,72 | 3,2074 | 5,7434 |
| 300 | 85,8086 | 1,4042 | 21,67 | 1344,63 | 2748,62 | 3,2546 | 5,7042 |
| 305 | 92,0166 | 1,4253 | 19,95 | 1372,94 | 2738,39 | 3,3023 | 5,664 |
| 310 | 98,5643 | 1,4481 | 18,35 | 1401,86 | 2726,94 | 3,3504 | 5,6227 |
| 315 | 105,466 | 1,4726 | 16,87 | 1431,45 | 2714,12 | 3,3992 | 5,5801 |
| 320 | 112,7368 | 1,4993 | 15,49 | 1461,8 | 2699,76 | 3,4488 | 5,5359 |
| 325 | 120,3928 | 1,5285 | 14,2 | 1493,02 | 2683,65 | 3,4993 | 5,4898 |
| 330 | 128,4517 | 1,5608 | 12,99 | 1525,3 | 2665,49 | 3,5509 | 5,4413 |
| 335 | 136,9327 | 1,5968 | 11,87 | 1558,54 | 2645,1 | 3,6036 | 5,3903 |
| 340 | 145,857 | 1,6375 | 10,8 | 1593,58 | 2621,68 | 3,6586 | 5,3354 |
| 345 | 155,2483 | 1,6845 | 9,78 | 1630,38 | 2594,85 | 3,7159 | 5,2761 |
| 350 | 165,133 | 1,7398 | 8,81 | 1669,7 | 2563,58 | 3,7765 | 5,2109 |
| 355 | 175,541 | 1,8025 | 7,87 | 1712,57 | 2526,39 | 3,842 | 5,1376 |
| 360 | 186,5066 | 1,8944 | 6,95 | 1760,77 | 2480,71 | 3,9153 | 5,0523 |
| 365 | 198,0688 | 2,0161 | 5,99 | 1818,19 | 2421,03 | 4,002 | 4,9467 |
| 370 | 210,2728 | 2,2181 | 4,93 | 1894,95 | 2331,81 | 4,1178 | 4,797 |
| 374,14 | 220,89 | 3,155 | 3,15 | 2099,04 | 2099,04 | 4,4297 | 4,4297 |

Annexe B : Table thermodynamique de vapeur saturé

Table de vapeur saturée

| Pression négative (vide) | Pression | | Température | | Chaleur sensible du liquide (h_f) | | Chaleur latente de vaporisation (h_{fg}) | | Chaleur totale (h_g) | | Volume massique de la vapeur (v_g) | | Volume massique du liquide (v_f) | |
|-----------------------------|----------|-------|-------------|-----|---|-------|---|-------|--------------------------------|-------|---|--------------------|---|--------------------|
| | po de Hg | kPa | °F | °C | Btu/lb | kJ/kg | Btu/lb | KJ/kg | Btu/lb | kJ/kg | pi ³ /lb | m ³ /kg | pi ³ /lb | m ³ /kg |
| | | | | | | | | | | | | | | |
| | 28,5 | -96,4 | 32 | 0 | 0 | 0 | 1076 | 2503 | 1076 | 2503 | 3302,40 | 206,07 | 0,016 | 0,0010 |
| | 24,43 | -82,7 | 126 | 52 | 94 | 219 | 1022 | 2377 | 1116 | 2596 | 173,76 | 10,84 | 0,016 | 0,0010 |
| | 20,36 | -68,9 | 153 | 67 | 121 | 281 | 1006 | 2340 | 1127 | 2621 | 90,64 | 5,66 | 0,016 | 0,0010 |
| | 16,29 | -55,1 | 170 | 77 | 138 | 321 | 996 | 2317 | 1134 | 2638 | 61,98 | 3,87 | 0,016 | 0,0010 |
| | 12,22 | -41,3 | 183 | 84 | 151 | 351 | 989 | 2300 | 1139 | 2649 | 47,34 | 2,95 | 0,016 | 0,0010 |
| | 8,14 | -27,5 | 193 | 89 | 161 | 374 | 982 | 2284 | 1143 | 2659 | 38,42 | 2,40 | 0,016 | 0,0010 |
| | 4,07 | -13,8 | 202 | 94 | 170 | 395 | 977 | 2273 | 1147 | 2668 | 32,39 | 2,02 | 0,016 | 0,0010 |
| | 0,02 | -0,01 | 210 | 99 | 178 | 414 | 972 | 2261 | 1150 | 2675 | 28,04 | 1,75 | 0,016 | 0,0010 |
| | psi g | kPa | °F | °C | Btu/lb | kJ/kg | Btu/lb | KJ/kg | Btu/lb | kJ/kg | pi ³ /lb | m ³ /kg | pi ³ /lb | m ³ /kg |
| 0 | 0 | 0 | 212 | 100 | 180 | 419 | 970 | 2256 | 1150 | 2675 | 26,80 | 1,67 | 0,016 | 0,0010 |
| 1 | 7 | 215 | 102 | 183 | 426 | 967 | 2249 | 1150 | 2675 | 24,30 | 1,52 | 0,016 | 0,0010 | |
| 2 | 14 | 218 | 103 | 186 | 433 | 965 | 2245 | 1151 | 2677 | 23,00 | 1,44 | 0,016 | 0,0010 | |
| 3 | 21 | 222 | 106 | 190 | 442 | 963 | 2240 | 1153 | 2682 | 21,80 | 1,36 | 0,016 | 0,0010 | |
| 4 | 28 | 224 | 107 | 193 | 449 | 961 | 2235 | 1154 | 2684 | 20,70 | 1,29 | 0,016 | 0,0010 | |
| 5 | 34 | 227 | 108 | 195 | 454 | 959 | 2231 | 1154 | 2684 | 19,80 | 1,24 | 0,016 | 0,0010 | |
| 6 | 41 | 230 | 110 | 198 | 461 | 958 | 2228 | 1156 | 2689 | 18,90 | 1,18 | 0,016 | 0,0010 | |
| 7 | 48 | 232 | 111 | 200 | 465 | 956 | 2224 | 1156 | 2689 | 18,10 | 1,13 | 0,016 | 0,0010 | |
| 8 | 55 | 235 | 113 | 203 | 472 | 955 | 2221 | 1158 | 2694 | 17,40 | 1,09 | 0,016 | 0,0010 | |
| 9 | 62 | 237 | 114 | 205 | 477 | 953 | 2217 | 1158 | 2694 | 16,70 | 1,04 | 0,016 | 0,0010 | |
| 10 | 69 | 239 | 115 | 208 | 484 | 952 | 2214 | 1160 | 2698 | 16,10 | 1,00 | 0,016 | 0,0010 | |
| 11 | 76 | 242 | 117 | 210 | 488 | 950 | 2210 | 1160 | 2698 | 15,60 | 0,97 | 0,016 | 0,0010 | |
| 12 | 83 | 244 | 118 | 212 | 493 | 949 | 2207 | 1161 | 2700 | 15,00 | 0,94 | 0,017 | 0,0011 | |
| 13 | 90 | 246 | 119 | 214 | 498 | 947 | 2203 | 1161 | 2700 | 14,50 | 0,90 | 0,017 | 0,0011 | |
| 14 | 97 | 248 | 120 | 216 | 502 | 946 | 2200 | 1162 | 2703 | 14,00 | 0,87 | 0,017 | 0,0011 | |
| 15 | 103 | 250 | 121 | 218 | 507 | 945 | 2198 | 1163 | 2705 | 13,60 | 0,85 | 0,017 | 0,0011 | |
| 16 | 110 | 252 | 122 | 220 | 512 | 943 | 2193 | 1163 | 2705 | 13,20 | 0,82 | 0,017 | 0,0011 | |
| 17 | 117 | 254 | 123 | 222 | 516 | 942 | 2191 | 1164 | 2707 | 12,80 | 0,80 | 0,017 | 0,0011 | |
| 18 | 124 | 255 | 124 | 224 | 521 | 941 | 2189 | 1165 | 2710 | 12,50 | 0,78 | 0,017 | 0,0011 | |
| 19 | 131 | 257 | 125 | 226 | 526 | 940 | 2186 | 1166 | 2712 | 12,10 | 0,76 | 0,017 | 0,0011 | |
| 20 | 138 | 259 | 126 | 227 | 528 | 939 | 2184 | 1166 | 2712 | 11,10 | 0,69 | 0,017 | 0,0011 | |
| 25 | 172 | 267 | 131 | 236 | 549 | 933 | 2170 | 1169 | 2719 | 10,40 | 0,65 | 0,017 | 0,0011 | |
| 30 | 207 | 274 | 134 | 243 | 565 | 926 | 2154 | 1169 | 2719 | 9,40 | 0,59 | 0,017 | 0,0011 | |
| 35 | 241 | 281 | 138 | 250 | 582 | 923 | 2147 | 1173 | 2728 | 8,50 | 0,53 | 0,017 | 0,0011 | |
| 40 | 276 | 287 | 142 | 256 | 595 | 919 | 2138 | 1175 | 2733 | 7,74 | 0,48 | 0,017 | 0,0011 | |
| 45 | 310 | 292 | 144 | 262 | 609 | 914 | 2126 | 1176 | 2735 | 7,14 | 0,45 | 0,017 | 0,0011 | |
| 50 | 345 | 298 | 148 | 267 | 621 | 911 | 2119 | 1178 | 2740 | 6,62 | 0,41 | 0,017 | 0,0011 | |
| 55 | 379 | 302 | 150 | 272 | 633 | 907 | 2110 | 1179 | 2742 | 6,17 | 0,39 | 0,017 | 0,0011 | |
| 60 | 414 | 307 | 153 | 277 | 644 | 903 | 2100 | 1180 | 2745 | 5,79 | 0,36 | 0,017 | 0,0011 | |
| 65 | 448 | 312 | 156 | 282 | 656 | 900 | 2093 | 1182 | 2749 | 5,45 | 0,34 | 0,017 | 0,0011 | |
| 70 | 483 | 316 | 158 | 286 | 665 | 897 | 2086 | 1183 | 2752 | 5,14 | 0,32 | 0,017 | 0,0011 | |
| 75 | 517 | 320 | 160 | 290 | 675 | 893 | 2077 | 1183 | 2752 | 4,87 | 0,30 | 0,017 | 0,0011 | |
| 80 | 552 | 324 | 162 | 294 | 684 | 890 | 2070 | 1184 | 2754 | 4,64 | 0,29 | 0,017 | 0,0011 | |
| 85 | 586 | 327 | 164 | 298 | 693 | 888 | 2065 | 1186 | 2759 | 4,42 | 0,28 | 0,017 | 0,0011 | |
| 90 | 621 | 331 | 166 | 301 | 700 | 887 | 2063 | 1188 | 2763 | 4,24 | 0,26 | 0,017 | 0,0011 | |
| 95 | 655 | 334 | 168 | 305 | 709 | 884 | 2056 | 1189 | 2766 | 4,03 | 0,25 | 0,017 | 0,0011 | |
| 100 | 689 | 338 | 170 | 308 | 716 | 882 | 2052 | 1190 | 2768 | 3,88 | 0,24 | 0,017 | 0,0011 | |
| 105 | 724 | 341 | 172 | 312 | 726 | 877 | 2040 | 1189 | 2766 | 3,72 | 0,23 | 0,017 | 0,0011 | |
| 110 | 758 | 343 | 173 | 314 | 730 | 876 | 2038 | 1190 | 2768 | 3,62 | 0,23 | 0,017 | 0,0011 | |

| Pression | | Température | | Chaleur sensible du liquide (h _l) | | Chaleur latente de vaporisation (h _g) | | Chaleur sensible du liquide (h _l) | | Volume massique de la vapeur (v _g) | | Chaleur latente de vaporisation (h _g) | |
|----------|-------|-------------|-----|---|-------|---|-------|---|-------|--|--------------------|---|--------|
| psi g | kPa | °F | °C | Btu/lb | kJ/kg | Btu/lb | kJ/kg | Btu/lb | kJ/kg | ft ³ /lb | m ³ /kg | BTU/lb | kJ/kg |
| 115 | 793 | 347 | 175 | 318 | 740 | 872 | 2028 | 1190 | 2768 | 3,44 | 0,21 | 0,017 | 0,0011 |
| 120 | 827 | 350 | 177 | 321 | 747 | 871 | 2026 | 1192 | 2773 | 3,34 | 0,21 | 0,018 | 0,0011 |
| 125 | 862 | 353 | 178 | 324 | 754 | 867 | 2017 | 1191 | 2770 | 3,21 | 0,20 | 0,018 | 0,0011 |
| 130 | 896 | 355 | 179 | 327 | 761 | 866 | 2014 | 1193 | 2775 | 3,12 | 0,19 | 0,018 | 0,0011 |
| 135 | 931 | 358 | 181 | 329 | 765 | 864 | 2010 | 1193 | 2775 | 3,02 | 0,19 | 0,018 | 0,0011 |
| 140 | 965 | 361 | 183 | 332 | 772 | 862 | 2005 | 1194 | 2777 | 2,92 | 0,18 | 0,018 | 0,0011 |
| 145 | 1000 | 363 | 184 | 335 | 779 | 860 | 2000 | 1195 | 2780 | 2,84 | 0,18 | 0,018 | 0,0011 |
| 150 | 1034 | 366 | 186 | 337 | 784 | 858 | 1996 | 1195 | 2780 | 2,75 | 0,17 | 0,018 | 0,0011 |
| 155 | 1069 | 368 | 187 | 340 | 791 | 854 | 1986 | 1194 | 2777 | 2,67 | 0,17 | 0,018 | 0,0011 |
| 160 | 1103 | 370 | 188 | 342 | 795 | 853 | 1984 | 1195 | 2780 | 2,60 | 0,16 | 0,018 | 0,0011 |
| 165 | 1138 | 373 | 189 | 345 | 802 | 852 | 1982 | 1197 | 2784 | 2,53 | 0,16 | 0,018 | 0,0011 |
| 170 | 1172 | 375 | 191 | 347 | 807 | 850 | 1977 | 1197 | 2784 | 2,47 | 0,15 | 0,018 | 0,0011 |
| 175 | 1207 | 378 | 192 | 350 | 814 | 848 | 1972 | 1198 | 2787 | 2,40 | 0,15 | 0,018 | 0,0011 |
| 180 | 1241 | 380 | 193 | 352 | 819 | 846 | 1968 | 1198 | 2787 | 2,34 | 0,15 | 0,018 | 0,0011 |
| 185 | 1276 | 382 | 194 | 355 | 826 | 844 | 1963 | 1199 | 2789 | 2,29 | 0,14 | 0,018 | 0,0011 |
| 190 | 1310 | 384 | 196 | 357 | 830 | 842 | 1958 | 1199 | 2789 | 2,23 | 0,14 | 0,018 | 0,0011 |
| 195 | 1344 | 386 | 197 | 359 | 835 | 840 | 1954 | 1199 | 2789 | 2,18 | 0,14 | 0,018 | 0,0011 |
| 200 | 1379 | 388 | 198 | 361 | 840 | 838 | 1949 | 1199 | 2789 | 2,14 | 0,13 | 0,018 | 0,0011 |
| 210 | 1448 | 392 | 200 | 365 | 849 | 835 | 1942 | 1200 | 2791 | 2,05 | 0,13 | 0,018 | 0,0011 |
| 220 | 1517 | 396 | 202 | 369 | 858 | 831 | 1933 | 1200 | 2791 | 1,96 | 0,12 | 0,018 | 0,0011 |
| 230 | 1586 | 399 | 204 | 373 | 868 | 828 | 1926 | 1201 | 2794 | 1,88 | 0,12 | 0,018 | 0,0011 |
| 240 | 1655 | 403 | 206 | 377 | 877 | 824 | 1917 | 1201 | 2794 | 1,81 | 0,11 | 0,018 | 0,0011 |
| 250 | 1724 | 406 | 208 | 380 | 884 | 821 | 1910 | 1201 | 2794 | 1,75 | 0,11 | 0,018 | 0,0011 |
| 260 | 1793 | 410 | 210 | 384 | 893 | 817 | 1900 | 1201 | 2794 | 1,68 | 0,10 | 0,018 | 0,0011 |
| 270 | 1862 | 413 | 212 | 387 | 900 | 814 | 1893 | 1201 | 2794 | 1,63 | 0,10 | 0,018 | 0,0011 |
| 280 | 1931 | 416 | 213 | 391 | 909 | 811 | 1886 | 1202 | 2796 | 1,57 | 0,10 | 0,018 | 0,0011 |
| 290 | 1999 | 419 | 215 | 394 | 916 | 807 | 1877 | 1201 | 2794 | 1,52 | 0,095 | 0,018 | 0,0011 |
| 300 | 2068 | 421 | 216 | 397 | 923 | 805 | 1872 | 1202 | 2796 | 1,47 | 0,092 | 0,018 | 0,0011 |
| 400 | 2758 | 448 | 231 | 426 | 991 | 774 | 1800 | 1200 | 2791 | 1,09 | 0,068 | 0,019 | 0,0012 |
| 500 | 3447 | 469 | 243 | 449 | 1044 | 748 | 1740 | 1197 | 2784 | 0,87 | 0,054 | 0,019 | 0,0012 |
| 600 | 4137 | 490 | 254 | 472 | 1098 | 727 | 1691 | 1199 | 2789 | 0,73 | 0,046 | 0,020 | 0,0012 |
| 700 | 4826 | 505 | 263 | 490 | 1140 | 703 | 1635 | 1193 | 2775 | 0,64 | 0,040 | 0,020 | 0,0012 |
| 800 | 5516 | 520 | 271 | 514 | 1196 | 680 | 1582 | 1184 | 2754 | 0,56 | 0,035 | 0,020 | 0,0012 |
| 900 | 6205 | 534 | 279 | 532 | 1237 | 661 | 1537 | 1193 | 2775 | 0,49 | 0,031 | 0,021 | 0,0013 |
| 1000 | 6895 | 548 | 287 | 547 | 1272 | 642 | 1493 | 1189 | 2766 | 0,44 | 0,028 | 0,021 | 0,0013 |
| 1100 | 7584 | 558 | 292 | 564 | 1312 | 621 | 1444 | 1185 | 2756 | 0,39 | 0,024 | 0,022 | 0,0014 |
| 1200 | 8274 | 567 | 297 | 579 | 1347 | 603 | 1403 | 1182 | 2749 | 0,35 | 0,022 | 0,022 | 0,0014 |
| 1300 | 8963 | 579 | 304 | 593 | 1379 | 583 | 1356 | 1176 | 2735 | 0,32 | 0,020 | 0,022 | 0,0014 |
| 1400 | 9653 | 588 | 309 | 606 | 1410 | 565 | 1314 | 1171 | 2724 | 0,29 | 0,018 | 0,023 | 0,0014 |
| 1500 | 10342 | 597 | 314 | 619 | 1440 | 548 | 1275 | 1167 | 2714 | 0,27 | 0,017 | 0,023 | 0,0014 |
| 1600 | 11032 | 606 | 319 | 626 | 1456 | 536 | 1247 | 1162 | 2703 | 0,25 | 0,016 | 0,023 | 0,0014 |
| 1700 | 11721 | 614 | 323 | 638 | 1484 | 517 | 1203 | 1155 | 2687 | 0,23 | 0,014 | 0,024 | 0,0015 |
| 1800 | 12411 | 622 | 328 | 650 | 1512 | 499 | 1161 | 1149 | 2673 | 0,22 | 0,014 | 0,024 | 0,0015 |
| 1900 | 13100 | 629 | 332 | 661 | 1537 | 480 | 1116 | 1141 | 2654 | 0,20 | 0,013 | 0,025 | 0,0016 |
| 2000 | 13789 | 636 | 336 | 673 | 1565 | 461 | 1072 | 1134 | 2638 | 0,19 | 0,012 | 0,025 | 0,0016 |
| 2100 | 14479 | 643 | 339 | 685 | 1593 | 442 | 1028 | 1127 | 2621 | 0,17 | 0,011 | 0,026 | 0,0016 |
| 2200 | 15168 | 650 | 343 | 696 | 1619 | 422 | 982 | 1118 | 2600 | 0,16 | 0,010 | 0,026 | 0,0016 |
| 2300 | 15858 | 656 | 347 | 708 | 1647 | 401 | 933 | 1109 | 2580 | 0,15 | 0,0094 | 0,027 | 0,0017 |
| 2400 | 16547 | 663 | 351 | 720 | 1675 | 380 | 884 | 1100 | 2559 | 0,14 | 0,0087 | 0,028 | 0,0017 |
| 2500 | 17237 | 669 | 354 | 732 | 1703 | 357 | 830 | 1089 | 2533 | 0,13 | 0,0081 | 0,028 | 0,0017 |
| 2600 | 17926 | 674 | 357 | 744 | 1731 | 333 | 775 | 1077 | 2505 | 0,12 | 0,0075 | 0,029 | 0,0018 |
| 2700 | 18616 | 680 | 360 | 758 | 1763 | 308 | 716 | 1066 | 2480 | 0,11 | 0,0069 | 0,030 | 0,0019 |
| 2800 | 19305 | 685 | 363 | 772 | 1796 | 279 | 649 | 1051 | 2445 | 0,10 | 0,0062 | 0,031 | 0,0019 |
| 3000 | 20684 | 696 | 369 | 805 | 1872 | 207 | 481 | 1012 | 2354 | 0,08 | 0,0050 | 0,034 | 0,0021 |
| 3193 | 22015 | 706 | 374 | 896 | 2084 | 0 | 0 | 896 | 2084 | 0,04 | 0,0025 | 0,048 | 0,0030 |

Résumé :

La production de vapeur est un processus d'énergie essentiel dans diverses industries, et l'amélioration de son efficacité peut entraîner des économies significatives d'énergies et de couts, tout en réduisant l'impact environnemental.

L'étude commence par une analyse détaillée des systèmes de production de vapeur existants, tenter d'améliorer la qualité de la production grâce à l'arrivée de vapeur sous forme d'une vapeur saturé aux échangeurs de chaleurs. La récupération de condensat et l'intégration d'un économiseur se révèle particulièrement efficace, en récupérant et en réutilisant le condensat on réduit la quantité d'eau nécessaire ce qui diminue les couts d'eau. Simultanément, en utilisant un économiseur pour récupérer la chaleur résiduelle, cela diminue la quantité de gaz nécessaire consommé, ce qui fait réduire les couts.

Mots clés : Générateur de vapeur, condensat, économiseur, débit combustible, échangeur de chaleur.

Abstract:

Steam generation is an essential energy process in various industries, and improving its efficiency can lead to significant energy and cost savings, while reducing environmental impact.

The study begins with a detailed analysis of existing steam generation systems, attempting to improve production quality by delivering saturated steam to heat exchangers. Condensate recovery and the integration of an economizer are particularly effective: by recovering and reusing condensate, the amount of water required is reduced, thus cutting water costs. At the same time, by using an economizer to recover residual heat, the amount of gas consumed is reduced, which in turn reduces costs.

Key words: Steam generator, condensate, economizer, fuel flow, heat exchanger.

ملخص

يُعتبر توليد البخار عملية أساسية للطاقة في مختلف الصناعات، ويمكن أن يؤدي تحسين كفاءته إلى توفير كبير في الطاقة والتكاليف، مع تقليل الأثر البيئي. وتبدأ الدراسة بتحليل مفصل لأنظمة توليد البخار الحالية، في محاولة لتحسين جودة توليد البخار عن طريق توصيل البخار المشبع إلى المبادلات الحرارية. وتعتبر استعادة المكثفات ودمج الموفر الاقتصادي فعالة بشكل خاص، فمن خلال استعادة المكثفات وإعادة استخدامها، يتم تقليل كمية المياه المطلوبة، وبالتالي خفض تكاليف المياه. وفي الوقت نفسه، فإن استخدام الموفر لاستعادة الحرارة المتبقية يقلل من كمية الغاز المطلوبة، مما يقلل بدوره من التكاليف.

الكلمات الرئيسية: مولد بخار، مكثفات، موفر، تدفق الوقود، مبادل حراري.